

SUEO NUMAZAWA

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM
CURUÁ-UNA/PA., PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Dissertação submetida à apreciação da
Comissão Examinadora para obtenção do
Título de Mestre em Ciências, no Cur-
so de Pós-graduação em Engenharia Flo-
restal do Setor de Ciências Agrárias
da Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA

1986

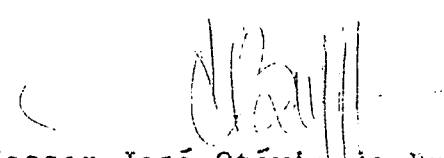


COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

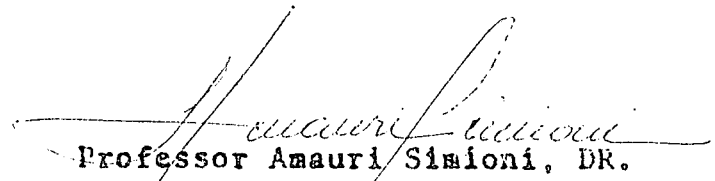
P A R E C E R

Os membros da Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pelo candidato SUEO NUMAZAWA, sob o título "APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL" para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, área de concentração TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, completando assim os requisitos necessários para receber o grau e o Diploma de Mestre em Ciências Florestais. Observação: O critério de avaliação da Dissertação e defesa da mesma a partir de novembro de 1980 é apenas APROVADA ou NÃO APROVADA.

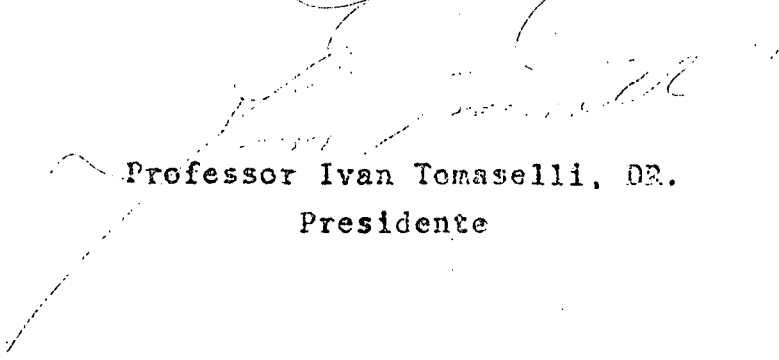
Curitiba, 20 de fevereiro de 1986.


Professor José Otávio de Brito, DR.

Primeiro Examinador


Professor Amauri Simioni, DR.

Segundo Examinador


Professor Ivan Tomaselli, DR.

Presidente



AOS MEUS PAIS E

MEUS IRMÃOS

À MINHA ESPOSA CARMEN E AOS MEUS FILHOS CAMILA E THIAGO

DEDICO

AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar os seus agradecimentos às seguintes pessoas e instituições:

Ao Professor Dr. IVAN TOMASELLI, pela orientação, incentivo, compreensão e amizade.

Aos Professores Drs. AMAURI SIMIONI e SIDON KEINERT JUNIOR, pela co-orientação, incentivo, compreensão e amizade.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, pela aceitação no curso.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pela concessão de bolsas de estudo.

À Faculdade de Ciências Agrárias do Paraná, por permitir a realização do curso.

À Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia, por permitir a coleta do material de estudo na Estação Experimental de Curuá-Una/Pa..

Aos Engenheiros Florestais JURIS JANKAUSKIS, PAULO LUIZ CONTENTE DE BARROS e WASHINGTON LUIS FONSECA FARIA, pela colaboração, incentivo e amizade.

Aos Professores, Colegas e Funcionários do Curso de Pós-Graduação, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Às Funcionárias da biblioteca do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio às consultas bibliográficas.

B I O G R A F I A

SUEO NUMAZAWA, filho de Tanizo Numazawa e Kon Numazawa nasceu em Tomé-Açu, Estado do Pará, no dia 25 de janeiro de 1952.

Concluiu o curso primário no ano de 1965, na Escola São Francisco Xavier; o curso ginásial em 1969 e o curso científico em 1972, ambos no Colégio Salesiano Nossa Senhora do Carmo em Belém do Pará.

Graduado em Engenharia Florestal no ano de 1976, pela Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, na cidade de Belém do Pará.

De janeiro a julho de 1977, realizou um estágio profissional no Centro de Tecnologia Madeireira - CTM, da SUDAM em Santarém, no Estado do Pará.

Em agosto de 1977 ingressou na carreira de magistério como Professor Colaborador da disciplina de Tecnologia da Madeira na Faculdade de Ciências Agrárias do Pará,

Em agosto de 1980 foi aprovado no concurso de Professor Auxiliar da disciplina de Tecnologia da Madeira, na Faculdade de Ciências Agrárias do Pará.

A partir de janeiro de 1981 passou a desenvolver atividades de magistério como Professor Assistente da disciplina de Tecnologia da Madeira, na Faculdade de Ciências Agrárias do Pará.

Em março de 1982, iniciou na Universidade Federal do Paraná, o curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal na área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS	x
RESUMO	xiii
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DA LITERATURA	04
2.1. Floresta Amazônica e sua potencialidade	04
2.2. Evolução da carbonização da madeira	04
2.3. Produtos obtidos na destilação seca da madeira ...	08
2.4. Fatores condicionantes da carbonização que influen ciam nas diversas propriedades do carvão vegetal .	11
2.4.1. Temperatura de carbonização	11
2.4.2. Tempo de carbonização	21
2.5. Influência da densidade da madeira sobre a densida de do carvão vegetal	24
2.6. Efeito do teor de umidade da madeira sobre a produ ção de carvão vegetal	25
2.7. Outros fatores que afetam nas diversas proprieda - des do carvão vegetal	27
2.8. Carbonização de madeiras tropícias	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1. Descrição do local de origem das madeiras	31
3.2. Seleção das madeiras	31
3.3. Coleta de materiais	32
3.4. Determinação da Densidade Básica da madeira	32
3.5. Determinação do número de amostras necessárias ao estudo	34
3.6. Carbonização das madeiras selecionadas	35
3.6. a) Preparo do material para a carbonização	35
3.6. b) Produção de carvão vegetal	35

3.7.	Estudo de propriedades do carvão	39
3.7.	a) Rendimento gravimétrico do carvão (base seca)..	39
3.7.	b) Densidade aparente do carvão	39
3.7.	c) Análises químicas imediatas do carvão	40
3.7.	c.1.] Teor de materiais voláteis (base seca)	40
3.7.	c.2.] Teor de cinzas [base seca]	40
3.7.	c.3.] Teor de carbono fixo (base seca)	41
3.7.	d) Poder calorífico superior do carvão	41
3.8.	Estudo sobre a Potencialidade energética da madei- ra convertida em carvão vegetal	41
3.9.	Análises estatísticas	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1.	Densidade básica da madeira	44
4.2.	Número de amostras necessárias ao estudo	45
4.3.	Rendimento gravimétrico do carvão	45
4.4.	Densidade aparente do carvão	51
4.5.	Análises químicas imediatas do carvão	56
4.6.	Poder calorífico superior do carvão	68
4.7.	Potencialidade energética da madeira convertida em carvão vegetal	74
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	83
6.	SUMMARY	86
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
8.	ANEXOS	92

LISTA DE FIGURAS

Página

1.	MODELO DE CARBONIZAÇÃO DE Kanury & Blackshear	06
2.	MODELO DE CARBONIZAÇÃO DE Holmes	07
3.	ZONAS DE DEGRADAÇÃO DA MADEIRA POR AÇÃO DO CALOR ..	08
4.	PERDA DE MASSA DA MADEIRA CARBONIZADA EM DIFERENTES TEMPERATURAS	13
5.	PERDA DE MASSA DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO	14
6.	VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO , EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO	19
7.	INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PIROLISE SOBRE A PERDA DE MASSA	22
8.	CORRELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE DA MADEIRA E A DENSI- DADE DO CARVÃO	24
9.	EFEITO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	25
10.	EFEITO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NO TEMPO DE CARBONIZAÇÃO	26
11.	VARIAÇÃO DO RENDIMENTO EM CARVÃO, EM FUNÇÃO DA POR- CENTAGEM DE CELULOSE + PENTOSANAS	27
12.	VARIAÇÃO DO RENDIMENTO EM CARVÃO, EM FUNÇÃO DA POR- CENTAGEM DE LIGNINA + EXTRATIVOS	27
13.	VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO, EM FUNÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO	28
14.	VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO, EM FUNÇÃO DO TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS	29

15.	DETERMINAÇÃO DE VOLUME DO CORPO DE PROVA, PELO MÉTODO DE PESAGEM	32
16.	ESQUEMA DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA	35
17.	ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA ATÉ O PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO	37
18.	RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO (base seca) À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO	49
19.	DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO	54
20.	TEOR DE CARBONO FIXO (base seca) À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO	59
21.	TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS (base seca) À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO	60
22.	TEOR DE CINZAS (base seca) À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO	62
23.	PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO	70
24.	POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA CONVERTÍVEL EM CARVÃO VEGETAL	77

LISTA DE QUADROS

Página

1.	PRODUTOS OBTIDOS NA DESTILAÇÃO SECA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i> , W.Hill.	09
2.	PRODUTOS OBTIDOS NA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA, SEGUNDO UHART'	10
3.	RENDIMENTO EM PESO DOS PRODUTOS OBTIDOS NA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i> , W.Hill. A DIFERENTES TEMPERATURAS	11
4.	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO NO RENDIMENTO EM CARVÃO VEGETAL.....	12
5.	RENDIMENTO EM CARVÃO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE CARBONIZAÇÃO	12
6.	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO SOBRE A DENSIDADE DO CARVÃO	15
7.	VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR DO CARVÃO VEGETAL, A DIFERENTES TEMPERATURAS DE CARBONIZAÇÃO	16
8.	ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO	16
9.	ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO DE <i>eucalyptus grandis</i> , EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO .	17
10.	ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO DE EUCALIPTOS DA AUSTRÁLIA, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO	17
11.	PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO COM BASE NA SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR	20

12. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO À DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO
13. MÉDIAS, AMPLITUDES DE VARIAÇÃO, DESVIOS PADRÕES E COEFICIENTES VARIAÇÃO; DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA
14. NÚMERO DE AMOSTRAS NECESSÁRIAS AO ESTUDO
15. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO (base seca), À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO
16. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO PELO MÉTODO DE SNK A 1% DE PROBABILIDADE
17. DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO
18. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DA DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO PELO MÉTODO DE SNK A 1% DE PROBABILIDADE
19. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO VEGETAL À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO
20. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO TEOR DE CARBONO FIXO PELO MÉTODO DE SNK A 1% DE PROBABILIDADE
21. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS PELO MÉTODO DE SNK A 1% DE PROBABILIDADE
22. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO TEOR DE CINZAS PELO MÉTODO DE SNK A 1% DE PROBABILIDADE
23. PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO
24. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO PELO MÉTODO DE SNK A 1% DE PROBABILIDADE

25. POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA CONVERTIVEL EM CARVÃO VEGETAL A DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO
26. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DA POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA PELO MÉTODO DE SNK A 1% DE PROBABILIDADE
27. ESTIMATIVA DA POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA POR ÁREA
28. RELAÇÃO ENTRE A POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA CARVÃO VEGETAL E TONELADA EQUIVALENTE PETRÓLEO

RESUMO

O desperdício de madeiras, sob a forma de resíduos da exploração florestal e das indústrias, é uma realidade vivida na região amazônica. Considerando este aspecto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um estudo de aproveitamento de madeiras residuais da exploração florestal do planalto da Estação Experimental de Curuá-Una/Pa., pertencente a Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia-SUDAM, para a produção de carvão vegetal.

As espécies estudadas foram: *Dinizia excelsa*, Ducke (Angelim pedra), *Manilkara huberi*, (Ducke) Standl. (Maçaranduba) e *Goupia glabra*, Aubl. (Cupiuba).

A carbonização das madeiras foi realizada em laboratório utilizando-se um forno elétrico. Foram adotadas três temperaturas finais de carbonização de 400°C, 600°C e 800°C, e dois tempos de permanência no patamar final de carbonização de 10 (dez) e 30 (trinta) minutos.

Foram estudadas as propriedades físico-químicas do carvão, constando de: rendimento gravimétrico do carvão em porcentagem; densidade básica aparente (g/cm^3); poder calorífico superior (Kjoule/Kg) e teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, em porcentagem. Além destas propriedades foi feito estudo sobre a potencialidade energética por quilo de madeira e por área (Kjoule/Kg e Kjoule/hectare).

Os principais resultados encontrados foram:

a) A temperatura final de carbonização foi o fator que mais influenciou nas propriedades estudadas.

b) O rendimento gravimétrico do carvão decresceu, principalmente, com o aumento da temperatura final de carbonização.

c) A densidade aparente do carvão variou muito pouco com as alterações da temperatura e do tempo de permanência no pata-

mar final de carbonização.

d) O teor de carbono fixo aumentou e o de materiais voláteis diminuiu em razão da elevação da temperatura final de carbonização. Esse comportamento também se observou quando o tempo de permanência foi aumentado, porém, de forma menos marcante. O teor de cinzas variou muito pouco em função das variações da temperatura e do tempo de permanência.

e) O poder calorífico superior variou de 29.819 a 35.096 Kjoule/Kg de carvão, sendo que, o carvão produzido sob a temperatura de 600°C apresentou um valor energético maior que os carvões produzidos sob 400°C e 800°C, independentemente da espécie e do tempo de permanência no patamar final de carbonização.

f) Para uma mesma temperatura e mesmo tempo de permanência, a madeira de Angelim pedra destacou-se com maior potencialidade energética por quilo de madeira, seguida de Maçaranduba e Cupiuba.

g) A madeira de Maçaranduba é a que proporcionou a maior potencialidade energética por área, seguida de Angelim pedra e Cupiuba.

h) O aproveitamento de resíduos de madeira, oriundos de uma floresta tropical densa, mecanicamente explorada, com uma intensidade igual a que foi conduzida por SUDAM³¹, pode significar o equivalente a 21,4 TEP (tonelada equivalente petróleo); a 15,6 TEP e a 14,5 TEP, por hectare, quando carbonizados respectivamente sob 400°C, 600°C e 800°C, considerando-se somente as espécies estudadas.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia representada pela sua maciça vegetação, constitui o elemento de maior expressão fito-geográfica da floresta tropical latino-americana.

O desenvolvimento do setor florestal, relativo ao aspecto técnico, econômico e social, tem levado as instituições com essa diretriz de atuação, a estabelecerem programas dirigidos à utilização racional dos recursos naturais desta importante região.

A adequação do uso da madeira, sob o ponto de vista do destino final, tem dinamizado e causado relativo avanço no setor de pesquisas. Dentre os produtos derivados da madeira, o carvão, tem uma posição de destaque na geração de energia, principalmente devido ao caráter renovável da matéria prima e a crise energética que ora atravessa o país.

A crescente demanda de carvão vegetal como redutor de minérios em indústrias siderúrgicas, bem como em núcleos consumidores, tais como residências, usinas termo-elétricas, indústrias químicas, etc., força a procura de alternativas de madeiras disponíveis para serem usadas como matéria prima.

A conversão intergral de uma floresta tropical densa exclusivamente em carvão vegetal, não seria admissível, tendo em vista, a ocorrência de madeiras de uso mais nobre. Seria justificado sim, o aproveitamento de fontes disponíveis como madeiras remanescentes de exploração florestal, de resíduos industriais, de capoeiras, etc...

No que tange a resíduos de madeira, JANKAUSKIS¹⁵ travaliou que para uma exploração mecanizada de uma floresta tropical densa de terra firme, igual a que foi praticada por SUDAM³¹, o volume médio de resíduos de madeira deixados na floresta foi de 142,3 m³. Também foi verificado que para cada m³ de madeira serrada são deixados cerca de 8 (oito) m³ de resíduos na mata.

O levantamento realizado por FCAP/IPT/SUDAM¹¹ indica que em 1981, foram serradas cerca de 5.399.000 m³ de madeiras, sendo que deste total, 66,8% procederam do Estado do Pará. Isto representa uma soma significativa de madeiras que ficam na floresta sob a forma de resíduos da exploração florestal, correspondendo em uma fonte disponível de matéria prima, sem uso definido, que poderia ser aproveitada para geração de energia.

Todas essas considerações, associadas a um fator indubitavelmente de maior importância que é a escassez de informações sobre madeiras da Amazônia, particularmente no que faz alusão a qualidade de carvão vegetal, incentiva o estudo sobre a carbonização de madeiras residuais da exploração florestal.

Com essa finalidade, o presente trabalho visou desenvolver um estudo sobre o aproveitamento de madeiras remanescentes da exploração florestal para produção de carvão vegetal, de três espécies de maior incidência volumétrica indicada no inventário florestal da Estação Experimental de Curuá-Una, realizado por SUDAM³¹ (Anexo 2, quadro 1). Estas espécies possuem características de porte dominante e são de expressiva demanda no mercado regional e nacional, e desta forma o volume de madeiras desperdiçadas na mata é elevado.

Os objetivos visados neste trabalho, foram:

a) Estudar as características das madeiras sob o aspecto da densidade básica aparente como fator indicativo para produção de carvão vegetal.

b) Produzir carvão vegetal em escala laboratorial com madeiras de *Dinizia excelsa*, Ducke (Angelim pedra); *Manilkara huberi*, (Ducke) Standl. (Maçaranduba) e *Goupia glabra*, Aubl. (Cupiu-ba).

c) Estudar a influência das condições de carbonização (temperatura e tempo de permanência no patamar final de carbonização), sobre as propriedades do carvão vegetal, tais como: densidade aparente; rendimento gravimétrico; poder calorífico superior e teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas.

d) Avaliar em caráter expedito a potencialidade energética da madeira convertível em carvão vegetal, co base no rendimento gravimétrico e poder calorífico superior do carvão, em kJoule/kg de madeira. Avaliar ainda a potencialidade energética

da madeira por área (kjoule/hectare), com base no volume de madeiras exploradas na área; na relação madeira serrada/resíduos na mata; no rendimento em madeira serrada e no potencial energético por quilo de madeira convertível em carvão vegetal.

2. REVISÃO DE LITERATURA.

2.1. FLORESTA AMAZÔNICA E SUA POTENCIALIDADE.

A floresta amazônica constitui-se pela sua grandiosidade um dos elementos mais marcantes da paisagem física regional. Segundo PANDOLFO²⁶ esta floresta recobre cerca de 260 milhões de hectares do território brasileiro. Desta área, cerca de 6,5 milhões de hectares é constituída de floresta de várzea, marginal aos rios e 253,5 milhões de hectares de floresta de terra firme.

A estimativa volumétrica de madeiras, fornecida pelos inventários florestais realizados na Amazônia, conforme citam SUDAM/IPT³³, é cerca de 178 m³ /ha na floresta de terra firme e de 90 m³ /ha na de várzea. A extrapolação destes números para a área total recoberta por estes dois tipos de floresta, foi estimado o volume de aproximadamente de 45 bilhões de m³ de madeiras em pé.

No que tange a resíduos de madeira, JANKAUSKIS¹⁸ cita que para uma exploração florestal mecanizada em mata de terra firme, com intensidade igual a que foi conduzida por SUDAM³¹ o volume médio de resíduos é cerca de 143,2 m³ por hectare. É dito ainda que para cada m³ de madeira serrada produzida na indústria, são deixados cerca de 8 m³ de resíduos na mata, e que o aproveitamento de madeiras representa em média apenas 10,5% do total da árvore. Isto significa que 89,5% do material lenhoso são desperdiçados. A extrapolação destes valores para a região representa uma quantidade importante de madeiras que ficam como resíduos da exploração florestal, os quais poderiam ser utilizados como matéria prima alternativa para geração de energia.

2.2. EVOLUÇÃO DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA.

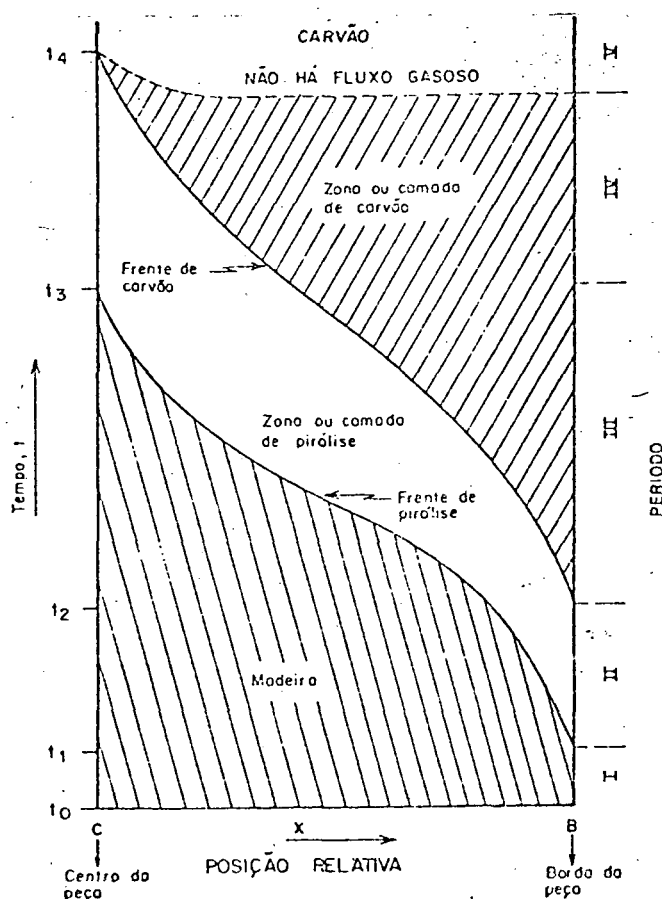
As reações termo-químicas que ocorrem durante a carbonização da madeira se processam de várias formas, conforme citam as literaturas.

De forma genérica, o modelo de carbonização da madeira a apresentado por Kanury & Blackshear, citado por OLIVEIRA et alii²⁴, caracteriza a evolução da carbonização.

Esse modelo foi desenvolvido para mostrar as formas de transferência de calor que ocorrem durante o processo de carbonização.

Na Figura 1, são mostrados os cinco períodos correspondentes a evolução do processo, desde o material original até o produto final que é o carvão, em função do tempo de exposição ao calor. Os períodos citados são: Período I - nessa fase o calor se propaga na madeira por condução. Até o t_1 , a madeira não sofre qualquer alteração, havendo apenas a liberação de água.

Figura: 1. MODELO DE CARBONIZAÇÃO DE Kanury & Blackshear.



Fonte: CETEC (Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. SPT(008), 1982.

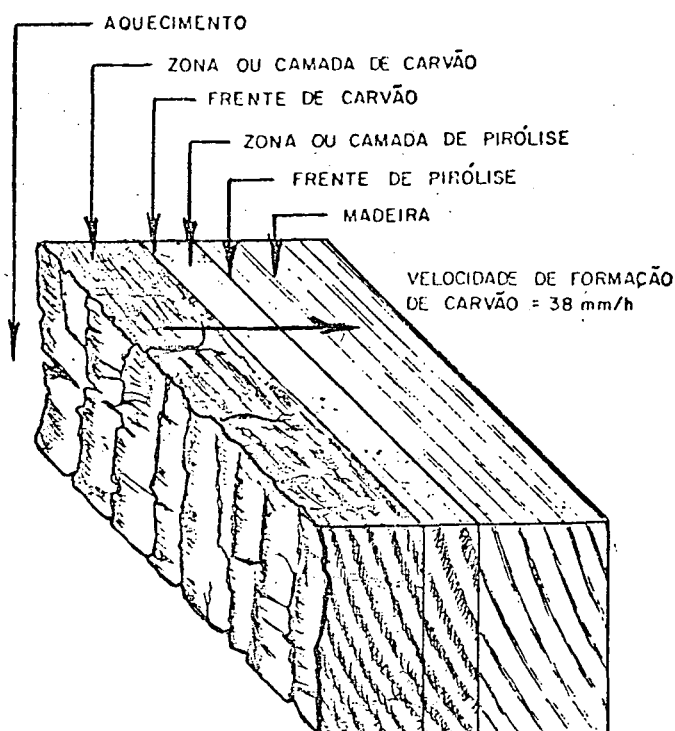
Período II - a madeira começa a sofrer as primeiras alterações,

formando o que se denomina "Frente da Pirólise". Nessa fase se distingue dois estágios: um correspondente a zona de pirólise e um outro em que a madeira continua aquecendo. Os gases quentes formados nessa zona transportam o calor para o exterior da madeira por convecção. Período III - inicia-se a formação do carvão, existindo ainda uma camada interna da madeira sem sofrer alteração. Nessa fase, a madeira sofre um maior grau de transformação caracterizada pela zona da pirólise que já atinge o centro da peça. A transferência de calor na zona do carvão se processa através de condução e convecção. Outros fenômenos ocorrem nessa zona. Os gases pesados sofrem uma decomposição catalizada pelo leito do carvão quente. Os gases leves ao passarem para o exterior podem encontrar oxigênio da atmosfera, produzindo uma reação de combustão (reação exotérmica), fornecendo energia na superfície do carvão. Período IV - essa fase é caracterizada pelo desaparecimento da madeira em seu estado original. A zona do carvão é predominante, restando apenas uma parte da zona da pirólise. Período V - corresponde a última fase da carbonização formada por uma única camada, a do carvão vegetal.

OLIVEIRA et alii²⁴ ainda mostra o modelo da carbonização de Holmes, que se baseou nos estudos de Schaffer. Esse modelo consistiu em aquecer um pedaço de madeira de três polegadas de espessura, conforme o procedimento prescrito pela ASTM (American Society for Testing and Material) E-119. A Figura 2 mostra as fases da carbonização, segundo o referido autor.

DOAT & PETROFF⁸ descrevem a evolução teórica da destilação seca da madeira em uma retorta, como sendo a seguinte: Fase A - com temperatura de 150°C a 170°C. Esta fase se caracteriza pela liberação de água contida na madeira. Fase B - com temperatura de 170°C a 270-280°C. Ocorre a liberação de CO e CO₂, acompanhados de pequena quantidade de vapores condensáveis contendo ácido acético e metanol. O alcatrão formado ainda é insignificante. Fase C - inicia-se a reação exotérmica de decomposição, liberando cerca de 210 quilocalorias por quilo de madeira. Esta reação ocorre numa faixa de temperatura de 280 a 300°C. A composição dos gases se modifica. Os gases oxigenados são reduzidos dando lugar ao metano e um pouco de hidrogênio. A formação de ácido acético, metanol, acetona, acetato de metila, álcool alílico, etc., atinge seu valor máximo. Fase D - corresponde a fa-

Figura: 2. MODELO DE CARBONIZAÇÃO DE HOLMES; CITADO POR OLIVEIRA et alii ²⁷.

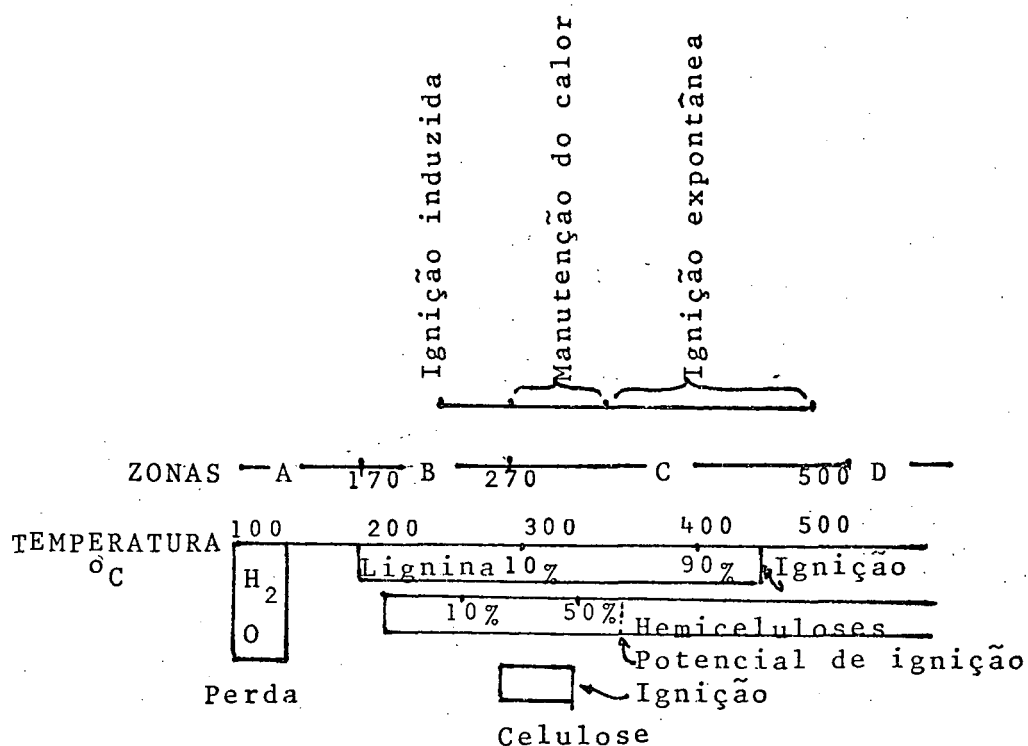


Fonte: CETEC (SPT-008), 1982

se, com temperatura de 400°C , onde praticamente termina a carbonização. A partir dessa fase se a temperatura for elevada, então ocorre a dissociação do carvão. A liberação de hidrocarbonetos aumenta até 500°C . Com temperatura acima desse limite, os hidrocarbonetos são pouco a pouco substituídos pelo hidrogênio. O processo é, então, denominado de fase do hidrogênio.

BEALL³ argumenta que a degradação térmica da madeira por ação do calor, na presença de oxigênio, se realiza em quatro zonas distintas, conforme mostradas na Figura 3. Essa degradação está em função dos principais constituintes químicos da madeira.

Figura: 3. ZONAS DE DEGRADAÇÃO DA MADEIRA POR AÇÃO DO CALOR.



Fonte: Wood Science (Oct., 1972)

É importante observar que as reações termo-químicas na carbonização da madeira, mencionadas pelos referidos autores, se realizam de forma semelhantes, porém, as temperaturas nas quais ocorrem tais reações não coincidem entre si. Isto demonstra que os limites existentes não são bem definidos ou dependem do processo e do material empregado.

2.3. PRODUTOS OBTIDOS NA DESTILAÇÃO DA MADEIRA.

A madeira apresenta na sua estrutura diversos compostos químicos, sendo os principais a celulose, as hemiceluloses e a lignina.

Esses compostos sob a ação do calor se degradam formando produtos de natureza sólida (carvão), líquida (ácido pirolenhoso) e gasosa (gases incondensáveis, como CO, CO₂, CH₄, etc.).

ALMEIDA¹ mostra os diversos produtos e as suas respectivas porcentagens, obtidos na destilação seca da madeira de *Eucalyptus grandis*, sob temperatura de 500°C, conforme mostrados no quadro a seguir.

Quadro: 1. PRODUTOS OBTIDOS NA DESTILAÇÃO SECA DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*.

Produtos	% em peso da madeira seca
<u>Produto sólido:</u>	
* Carvão	33
<u>Produto líquido:</u>	
* Ácido pirolenhoso	
- Ácido acético	5
- Metanol	2
- Alcatrão solúvel	5
- Água e constituintes menores	23,5
- Alcatrão	6,5
<u>Produto gasoso:</u>	
* Gases incondensáveis	
- CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ , etc..	25
Total	100,0

Fonte: CETEC (SPT-008), 1982.

UHART^{3,4} mostra os resultados quantitativos e qualitativos dos produtos obtidos na carbonização de 16 (dezesseis) madeiras da Amazônia, sob temperatura de 500°C, conforme visto no quadro: 2, a seguir.

Quadro: 2. PRODUTOS OBTIDOS NA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRAS, SEGUNDO UHART³⁴.

Produtõs	Rendimento (base seca), %
<u>Produto sólido:</u>	
* Carvão	33,72
<u>Produtos líquidos:</u>	
* Ácido acético	5,73
* Acetona + ác. fênico	1,44
* Metanol	2,50
* Acetato de metila	0,56
* Etilmetilcetona	0,05
* Fenol + cresol	0,75
* Gaiacol	0,45
* Produtos orgânicos di- versos	10,50
* Água	26,60
<u>Produtos gasosos:</u>	
* CO, CO ₂ , H ₂ , hidro- carbonetos.	17,50
Total	100,00

Fonte: UHART (1976)

Segundo POHL, citado por WENZL³⁶, a elevação da temperatura final de carbonização altera as porcentagens do rendimento em carvão, líquido pirolenhoso e gases incondensáveis. Esta afirmação é confirmada pelos resultados apresentados por OLIVEIRA et alii²³, mostrados no quadro 3, a seguir.

Quadro: 3. RENDIMENTO EM PESO DOS PRODUTOS OBTIDOS NA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*, W.HILL., A DIFERENTES TEMPERATURAS.

Temperatura - °C	Rendimento em peso (base seca), %		
	Carvão	Líquido	Gases
450	32,89	43,68	23,43
550	28,15	46,73	25,12
700	27,57	46,30	26,13

Fonte: CETEC (SPT-006), 1982.

É importante observar que os resultados apresentados por esses autores, indicam que o rendimento dos produtos obtidos numa carbonização, variam conforme as espécies e os graus de temperatura em que as madeiras são carbonizadas.

2.4. FATORES CONDICIONANTES DA CARBONIZAÇÃO QUE INFLUENCIAM NAS DIVERSAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL.

2.4.1. Temperatura de carbonização.

A temperatura de carbonização é conhecida como uma das variáveis de maior relevância, influenciando nas diversas propriedades do carvão vegetal, como rendimento, densidade, etc..

A influência dessa variável no rendimento em carvão, líquido pirolenhoso e gases incondensáveis é de fácil dedução: - quanto maior a temperatura de carbonização, maior é o grau de destilação, refletindo, portanto, no aumento da quantidade de gases, causando conseqüentemente a redução no rendimento em peso do carvão¹².

2.4.1.1. Rendimento gravimétrico do carvão.

Conforme mencionado anteriormente, o rendimento em carvão é sensivelmente influenciado pela temperatura de carbonização.

No trabalho de TARKOW, citado por OLIVEIRA et alii²⁴,

são mostrados os diferentes valores de rendimento em carvão obtido sob diferentes temperaturas, conforme visto no quadro 4, a seguir.

Quadro: 4. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO NO RENDIMENTO EM CARVÃO VEGETAL.

Temperatura - °C	Rendimento em carvão (base seca),%
200	91,80
300	51,40
400	37,80
500	31,00
600	29,10
700	27,80
800	26,70
900	26,60
1000	26,80
1100	26,10

Fonte: CETEC (SPT-008), 1982

HARRIS¹³ ao carbonizar madeiras de eucaliptos da Austrália, encontrou os seguintes valores de rendimento em carvão em função da temperatura de carbonização, conforme mostrados no quadro 5.

Quadro: 5. RENDIMENTO EM CARVÃO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE CARBONIZAÇÃO.

Temperatura - °C	Rendimento em carvão (%)
400	40,0
450	35,0
550	31,5
650	28,0

Fonte: World Forestry Congress, 1978.

VEADO et alii³⁵ ao carbonizarem madeiras de *Eucalyptus marginata*, sob temperaturas de 450°C e 650°C, obtiveram rendimento em carvão na ordem de 35% e 28%, respectivamente.

Essa tendência de decréscimo de rendimento em carvão em função do aumento da temperatura, também foi constatada por ALMEIDA¹, OLIVEIRA et alii²² e GOMES & OLIVEIRA¹².

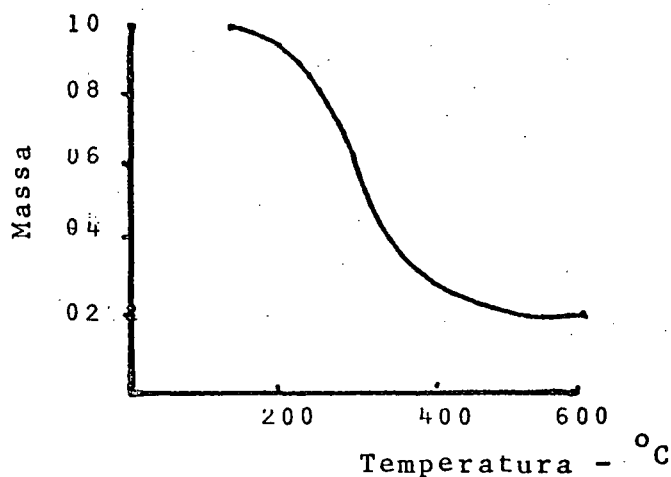
O decréscimo no rendimento é explicado em razão do aumento da temperatura facilitar a dissociação do carvão com a liberação dos gases, bem como gaseificar parte da estrutura sólida do mesmo¹. Esta argumentação vem concordar com a dedução feita por GOMES & OLIVEIRA¹², os quais citam que altas temperaturas favorecem altos graus de destilação, aumentando a quantidade de gases e, conseqüentemente diminuindo o rendimento em carvão.

2.4.1.2. Densidade aparente do carvão vegetal.

A densidade aparente do carvão está relacionada com a perda de massa e a contração volumétrica que a madeira sofre durante a carbonização.

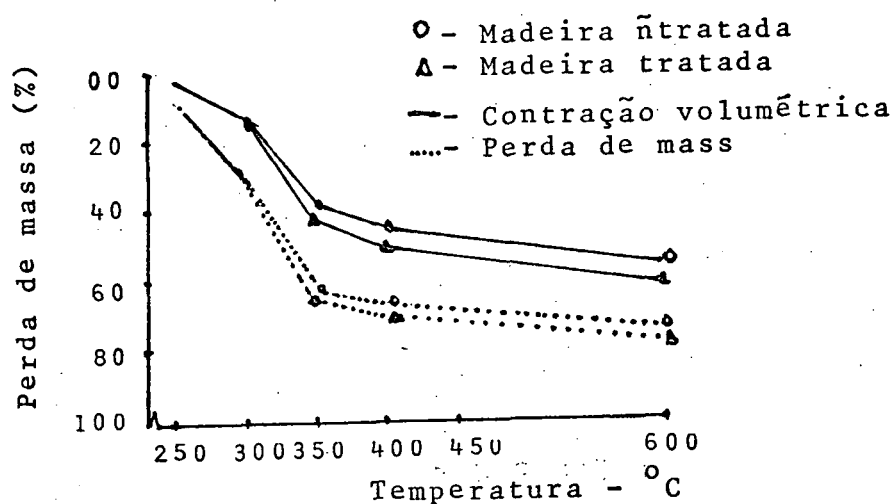
BEALL et alii⁵ e KRILA¹⁸, mencionam que a maior perda de massa e a maior contração volumétrica ocorrem na faixa de temperaturas de 200 a 400°C, conforme mostradas nas figuras 4 e 5, respectivamente.

Figura: 4. PERDA DE MASSA DA MADEIRA CARBONIZADA POR DIFERENTES TEMPERATURAS, SEGUNDO BEALL et alii⁵.



Fonte: Wood Science (jan., 1974)

Figura: 5. PERDA DE MASSA DA MADEIRA CARBONIZADA, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA, SEGUNDO KRILA²¹.



Fonte: Wood Science (july, 1980)

Pesquisa realizada com madeiras de *Quercus alba*, L. e *Carya ovata*, Mill., carbonizadas sob temperaturas de 250°C, 300°C, 400°C, 600°C e 800°C, indicaram perdas de massa em torno de 1/4 sob temperatura de 250°C e 1/5 sob 400°C. Em temperatura acima de 400°C, as perdas foram menos bruscas. Observou-se também que os carvões produzidos sob temperatura de 600°C, apresentaram menores valores de densidade²⁹.

Portanto, a densidade aparente do carvão vegetal depende do efeito da perda de massa (perda de peso) e do efeito da contração volumétrica da madeira carbonizada.

A influência da temperatura sobre a densidade aparente do carvão vegetal é conflitante segundo as literaturas.

BLANKENHORN et alii⁶ observaram que as densidades dos carvões produzidos com madeiras de *Prunus serotina*, Erth., apresentaram variações, tendo-se registrados os menores valores sob temperaturas de 500°C e 600°C, conforme visto no quadro 6 a seguir.

Quadro: 6. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO SOBRE A DENSIDADE DO CARVÃO.

Temperatura °C	320	500	600	700	800	900
Densidade ap. do carvão em g/cm ³	0,412	0,408	0,402	0,415	0,489	0,414

Fonte: Woos Science (july, 1978)

MENDES et alii²⁰ também observaram comportamento semelhante com madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill., carbonizadas sob temperaturas de 300°C, 500°C e 700°C. Os menores valores foram obtidos com carvões produzidos sob temperatura de 500°C.

Por outro lado, BAILEYS & BLANKENHORN² ao carbonizarem madeiras de *Quercus* sp, *Pinus taeda* L., *Prunus serotina*, *Ehth* e *Populus* sp, verificaram que esta última espécie não teve a densidade aparente do carvão diminuída sob temperatura de 500°C.

BEALL³ cita que a densidade do carvão parece que atinge o seu valor mínimo sob temperatura de 350°C.

Isto demonstra que a temperatura de carbonização influencia de uma forma ou de outra sobre a densidade aparente do carvão vegetal. A grande limitação dessas citações é que não fazem uma discussão clara sobre o assunto. Deduz-se, no entanto, que na faixa de temperatura em que ocorre uma redução da densidade aparente do carvão, o efeito da contração seja menor do que o efeito da perda de massa do material carbonizado.

2.4.1.3. Composição química do carvão vegetal.

A variação percentual dos componentes químicos do carvão também está condicionada a temperatura de carbonização.

Segundo WENZL³⁶ a composição química elementar do carvão varia sensivelmente com a temperatura de carbonização. O quadro 7 mostra esta variação.

Quadro: 7. VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR DO CARVÃO VEGETAL, A DIFERENTES TEMPERATURAS

Temperatura - °C	Composição química elementar (%)		
	C	H	O
200	52,3	6,3	41,4
300	73,2	4,9	21,9
400	82,7	3,8	13,5
500	89,6	3,1	6,7
600	92,6	2,6	5,2
800	95,8	1,0	3,3
1000	96,6	0,5	2,9

Fonte: WENZL (1970)

MENDES et alii²⁰ mostram os resultados da análise química imediata do carvão produzido com madeira de *Eucalyptus grandis*, W.Hill., com idades de 6, 8 e 10 anos, no quadro 8.

Quadro: 8. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO.

Temperatura - °C	Análise química imediata do carvão (%)		
	C.F.	M.V.	Cinzas
300	71,09	27,41	1,50
500	85,86	13,18	1,96
700	91,29	5,98	2,23
Idade: 6 anos			
300	68,67	30,52	0,81
500	86,21	12,69	1,10
700	93,61	5,22	1,17
Idade: 8 anos			
300	70,81	28,61	0,58
500	85,89	13,38	0,73
700	93,17	5,89	0,94
Idade: 10 anos			

C.F. - carbono fixo M.V. - materiais voláteis

Fonte: CETEC (SPT-008), 1982

No trabalho realizado pelo CETEC (Centro Tecnológico de Minas Gerais), citado por OLIVEIRA et alii²⁶, também são mostrados os resultados da análise química imediata do carvão produzido com madeira de *Eucalyptus grandis* W.Hill., com 5,5 anos de idade, sob temperatura distintas, conforme mostrados no quadro 9.

Quadro: 9. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO DE *Eucalyptus grandis*, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO.

Temperatura - °C	Análise química imediata do carvão(%)		
	C.F.	M.V.	Cinzas
450	75,06	21,03	3,91
550	86,53	10,12	3,35
700	89,82	7,25	2,93

C.F. (carbono fixo) M.V. (materiais voláteis)

Fonte: CETEC (SPT-006), 1982

HARRIS¹³ ao carbonizar madeiras de eucaliptos australianos, sob diferentes temperaturas, encontrou os seguintes valores percentuais de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, conforme mostrados no quadro 10.

Quadro: 10. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO DE EUCALIPTOS DA AUSTRÁLIA A DIFERENTES TEMPERATURAS DE CARBONIZAÇÃO.

Temperatura - °C	Análise química imediata do carvão(%)		
	C.F.	M.V.	Cinzas
400	78,0	21,5	0,5
450	82,0	17,5	0,5
550	88,5	11,0	0,5
650	95,0	4,5	0,5

C.F. (carbono fixo) M.V. (materiais voláteis)

Fonte: World Forestry Congress (1978)

É mencionado no trabalho de WENZL³⁶ que o teor de carbono fixo aumenta rapidamente com o acréscimo da temperatura de carbonização, e alcança um valor quase constante próximo à temperatura de 700°C.

O conteúdo de materiais voláteis do carvão é uma função

da temperatura de carbonização. A partir de 750°C, o teor de materiais voláteis é sensivelmente reduzido¹⁴.

Os resultados obtidos pelos pesquisadores anteriormente mencionados, indicam claramente que, quanto maior a temperatura de carbonização, maior é o teor de carbono fixo, e por conseguinte, menor o de materiais voláteis remanescentes no carvão.

Com relação a teor de cinzas, observa-se que existem divergências nos resultados mostrados por estes autores. MENDES et alii²⁰ citam que o teor de cinzas aumenta a medida que se eleva a temperatura final de carbonização. OLIVEIRA et alii²⁴ mostram uma tendência decrescente do teor de cinzas quando a temperatura é aumentada; enquanto que HARRIS¹³ encontrou valores constantes para qualquer temperatura de carbonização.

Outros autores como COLLET⁷ e EARL⁹, citam que o teor de cinzas depende diretamente da quantidade de materiais inorgânicos existentes na madeira carbonizada. LAMAXANA¹⁹ diz que o teor de cinzas do carvão varia com a espécie e o meio ambiente em que se desenvolve.

2.4.1.4. Poder calorífico superior do carvão.

A temperatura de carbonização é uma variável que também influencia no poder calorífico do carvão.

MENDES et alii²⁰ ao desenvolverem estudo sobre o poder calorífico teórico baseado na composição química elementar do carvão, através da fórmula:

$$P.C.S.(\text{teórico}) = \%C.8100/100 + (34000/100).(\%H - \%O/8)$$

onde,

P.C.S. - poder calorífico superior do carvão (kcal/kg)

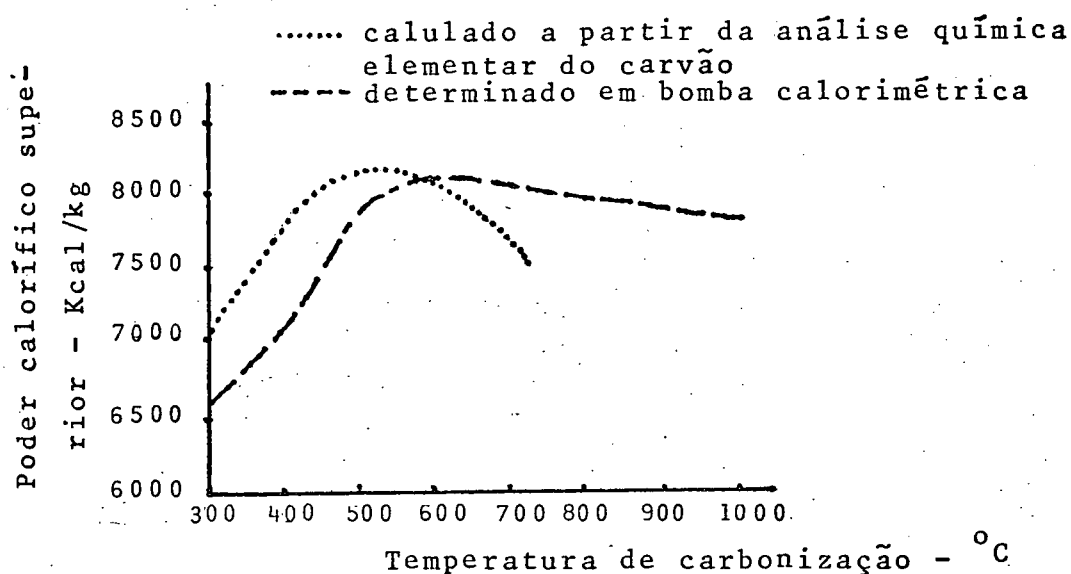
C - carbono

H - hidrogênio

O - oxigênio

e outro referente a poder calorífico superior, determinado em uma bomba calorimétrica, verificou que, os carvões produzidos sob temperaturas de 600°C e 500°C , respectivamente, apresentaram maiores valores de poder calorífico, conforme mostra a figura 6.

Figura: 6. VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO.



Fonte: CETEC (SPT-008), 1982

OLIVEIRA et alii²⁴ e SATONAKA²⁸, também citam que o poder calorífico do carvão vegetal atinge um valor máximo numa faixa de temperaturas de 500 a 600°C .

O aumento do calor de combustão do carvão produzido sob temperatura de 500°C , em comparação com o de 300°C , é resultante do maior acúmulo de carbono fixo e elevado calor de combustão dos materiais voláteis contidos no carvão. Por outro lado, apesar do maior acúmulo de carbono fixo no carvão produzido sob 700°C , em relação ao de 500°C , percebe-se um pequeno decréscimo do calor de combustão, isto decorrente possivelmente de pequena quantidade de materiais voláteis de elevado calor de combustão²⁴.

Segundo SATONAKA²⁸ a razão da pequena diminuição do poder calorífico superior do carvão na faixa de temperatura su-

perior a 600°C, possivelmente é devido ao grande efeito da diminuição da porcentagem de hidrogênio em relação ao efeito do aumento da porcentagem de carbono fixo.

RAMALHO²⁷ ao efetuar a destilação seca da madeira em um vaso fechado, verificou que, carvões produzidos sob diferentes temperaturas, apresentaram distintos valores de poder calorífico, tendo-se registrado o maior valor com o carvão produzido sob 515°C.

É interessante mostrar que, se tomarmos a fórmula teórica do poder calorífico superior apresentada por MENDES et alii²⁰, e substituirmos os valores de carbono fixo, hidrogênio e oxigênio encontrados por WENZL³⁶ sob diversas temperaturas, os maiores valores de poder calorífico, são alcançados com os carvões produzidos sob 500°C e 600°C, conforme visto no quadro 11.

Quadro: 11. PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO COM BASE NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR.

Temperatura °C	Composição química elementar do carvão (%)			P.C.S.(teórico)* Kcal./Kg
	C	H	O	
200	52,3	6,3	41,4	4.618
300	73,2	4,9	21,9	7,140
400	82,7	3,8	13,5	7.416
500	89,6	3,1	6,7	8.026
600	92,6	2,6	5,2	8.163
800	95,8	1,0	3,3	7.959
1000	96,6	0,5	2,9	7.871

$$*P.C.S.(teórico) = \%C \cdot \frac{8.100}{100} + \frac{34.000}{100} (\%H - \frac{\%O}{8})$$

Isto vem confirmar o argumento de SATONAKA²⁸, sem invalidar, no entanto, o de OLIVEIRA et alii²⁴.

Por outro lado, existem citações que contrariam os resultados e argumentos apresentados pelos pesquisadores anteriormente mencionados.

BAILEYS & BLANKENHORN² citam que o calor de combustão do carvão aumenta proporcionalmente com o acréscimo da temperatura de carbonização. O processo contínuo de carbonização aumenta o conteúdo de carbono fixo, consequentemente aumentando o calor de combustão do carvão.

EARL¹³ diz que o poder calorífico do carvão é praticamente equivalente ao de carbono. Carvão com alto teor de materiais voláteis pode ser esperado ter menor poder calorífico do que aquele com menor teor, consequentemente maior teor de carbono.

É importante, no entanto, observar que estes pesquisadores argumentam que o poder calorífico está em função, fundamentalmente do calor de combustão do carbono, sem considerar que os materiais voláteis também possuem uma certa quantidade de calorias. Esta é a razão para que hajam essas controvérsias de resultados.

2.4.2. Tempo de carbonização.

O tempo de carbonização pode ser caracterizado de duas formas: Primeira - considerando o tempo gasto na elevação da temperatura até o patamar final de carbonização, em função da taxa de aquecimento. Segunda - considerando o tempo de permanência no patamar final de carbonização.

2.4.2.1. Rendimento gravimétrico do carvão.

WENZL³⁶ argumenta que a medida que a taxa de aquecimento é aumentada, o rendimento em carvão decresce. Madeira de *Betula sp.*, carbonizada sob 400°C, utilizando quatro taxas de aquecimento correspondentes a 133,3°C/hora; 50°C/hora; 25°C/hora e 1,19°C/hora, resultaram em 25,51%; 30,85%; 33,18% e 39,44%, respectivamente, em carvão vegetal.

A mesma tendência verificada por WENZL³⁶, também foi verificada por OLIVEIRA & ALMEIDA²², ao carbonizarem madeiras de *Eucalyptus grandis*, W.Hill., sob temperatura de 430°C, utilizando-se quatro taxas de aquecimento de 1°C/minuto; 2,3°C/minuto; 2,3°C/hora e 6°C/hora, onde encontraram os seguintes valores de rendimento em carvão: 35,0%; 34,1%; 40,0% e 40,8%, respectivamente.

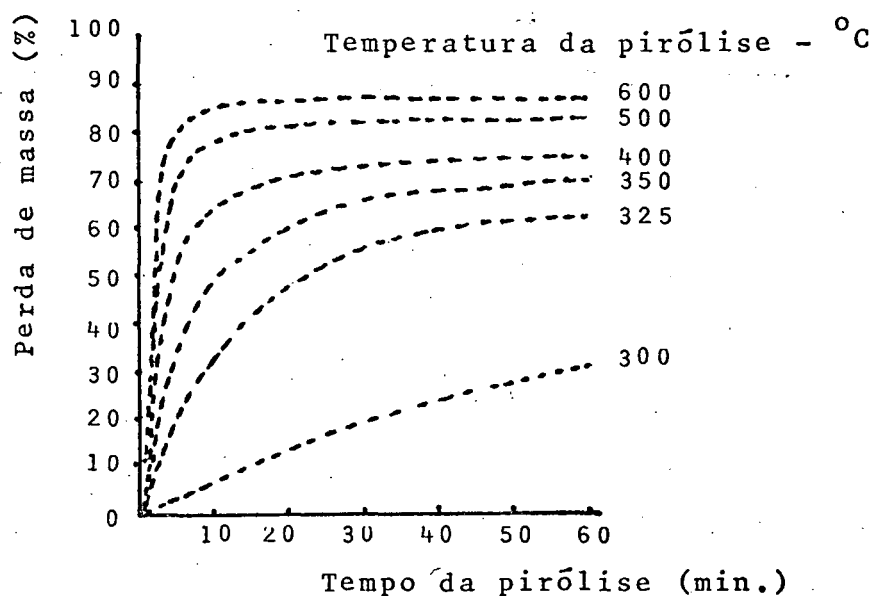
SLOCUM et alii²⁹ observaram que o rendimento em carvão é reduzido em torno de 8% quando o tempo de permanência no patamar final de carbonização de 400°C e 600°C, de zero hora foi aumentado para 50 horas. Para a temperatura de 800°C, o aumento de zero para 12 e 114 horas, refletiram numa redução de rendimento em carvão em torno de 3% e 10%, respectivamente.

Isto demonstra que quanto maior a taxa de aquecimento e/ou o tempo de permanência no patamar final de carbonização, menor é o rendimento em carvão. Esses resultados vem concordar em parte com a argumentação de GOMES & OLIVEIRA¹², os quais citam que quanto maior a destilação da madeira maior é a quantidade de gases produzidos, conseqüentemente, reduzindo o rendimento em peso do carvão.

2.4.2.2. Densidade aparente do carvão.

Considerando que um dos parâmetros que está relacionado com a densidade do carvão é a perda de massa, é importante salientar que segundo NANASSY & FUNG²¹ os fatores temperatura e tempo de pirólise fazem variar o percentual dessa perda de massa. Para temperaturas superiores a 400°C, observa-se uma certa tendência à estabilização da perda de massa a partir de trinta minutos, conforme visto na figura 7.

Figura: 7. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PIRÓLISE SOBRE A PERDA DE MASSA.



Fonte: Wood Science (jan., 1975)

Portanto, com relação a perda de massa, o fator tempo de carbonização parece ser mais importante na faixa de zero a trinta minutos.

MENDES et alii²⁰ relatam que o tempo de carbonização influencia na densidade aparente do carvão vegetal. Os carvões obtidos através de uma rápida carbonização (duas horas) apresentaram menores densidades do que os obtidos de uma lenta (setenta e duas horas). Os valores médios obtidos foram respectivamente de 0,46 g/cm³ e 0,70 g/cm³.

Isto demonstra tal qual a temperatura, o tempo de carbonização também influencia a densidade do carvão, sendo mais drástica para carbonização com alta taxa de aquecimento, ou seja, carbonização rápida.

2.4.2.3. Composição química do carvão.

Segundo pesquisas, o tempo de carbonização influencia muito pouco sobre os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas.

Na experiência realizada por CETEC, citada por OLIVEIRA et alii²⁴ foi verificada que os teores de carbono fixo e materiais voláteis variaram de forma crescente para o primeiro e de forma decrescente para o segundo, a medida que se aumentou a taxa de aquecimento, conforme mostrados no quadro 12.

Quadro: 12. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO A DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO.

Taxas de aquecimento	Análise química imediata do carvão (%)		
	C.F.	M.V.	Cinzas
1,0°C/minuto	78,45	20,62	0,93
2,3°C/minuto	79,15	19,94	0,91
2,3°C/hora	76,63	22,04	1,33
6,0°C/hora	78,70	20,30	1,00

C.F. - (carbono fixo)

M.V. - (materiais voláteis)

Fonte: CETEC (SPT-008), 1982.

MENDES et alii²⁰ citam que carvões produzidos sob taxas de aquecimento de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ e $3,4^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$, resultaram em 78,02% e 78,15%, respectivamente de carbono fixo.

KOROBKIN¹⁷ ao carbonizar madeiras sob diferentes temperaturas (250 a 750°C) e tempos de carbonização (6 a 12 horas), verificaram que o teor de carbono fixo foi sempre maior para o carvão obtido sob o tempo de doze horas do que o de seis horas.

A quantidade de materiais voláteis é uma função do tempo em que a madeira é exposta ao calor (LAMAXANA¹⁹).

É importante observar que a variação dos teores de carbono fixo e materiais voláteis ocorre tanto em função da velocidade de aquecimento como do tempo em que a madeira é submetida a carbonização.

Esses resultados vem em parte concordar com a argumentação de GOMES & OLIVEIRA¹², os quais citam que a quantidade de gases liberados na carbonização da madeira está em função do grau de destilação da mesma.

2.4.2.4. Poder calorífico do carvão.

Com relação a influência do tempo de carbonização da madeira sobre o poder calorífico do carvão vegetal, não foi encontrada citação a respeito do assunto.

Ressalta-se, no entanto que, se o tempo de carbonização influencia nos teores de carbono fixo (KOROBKIN¹⁷) e materiais voláteis (LAMAXANA¹⁹), é de se esperar que ele também afete o poder calorífico do carvão, uma vez que este está na dependência do calor de combustão dos respectivos componentes químicos.

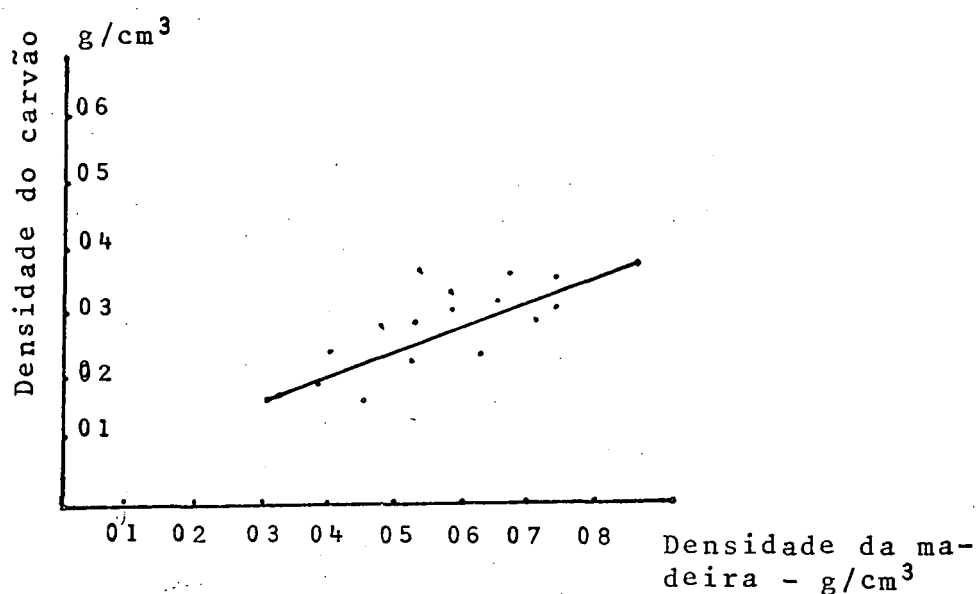
2.5. INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DA MADEIRA SOBRE A DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL.

As literaturas citam que a densidade da madeira tem correlação direta com a densidade do carvão vegetal.

Quanto maior a densidade da madeira, maior é a densidade do carvão.

Estudo sobre correlação entre a densidade da madeira e a densidade do carvão, foi realizado por DOAT & PETROFF⁸, os quais encontraram uma correlação de 0,89. A figura 8 mostra essa correlação.

Figura: 8. CORRELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE DA MADEIRA E A DENSIDADE DO CARVÃO.



Fonte: Revue Bois et Forêts des Tropique (jan/fev., 1975)

Nos estudos realizados por UHART³⁴ e LAMAXANA¹⁹, também foram constatadas essas correlações entre a densidade da madeira e a densidade do carvão.

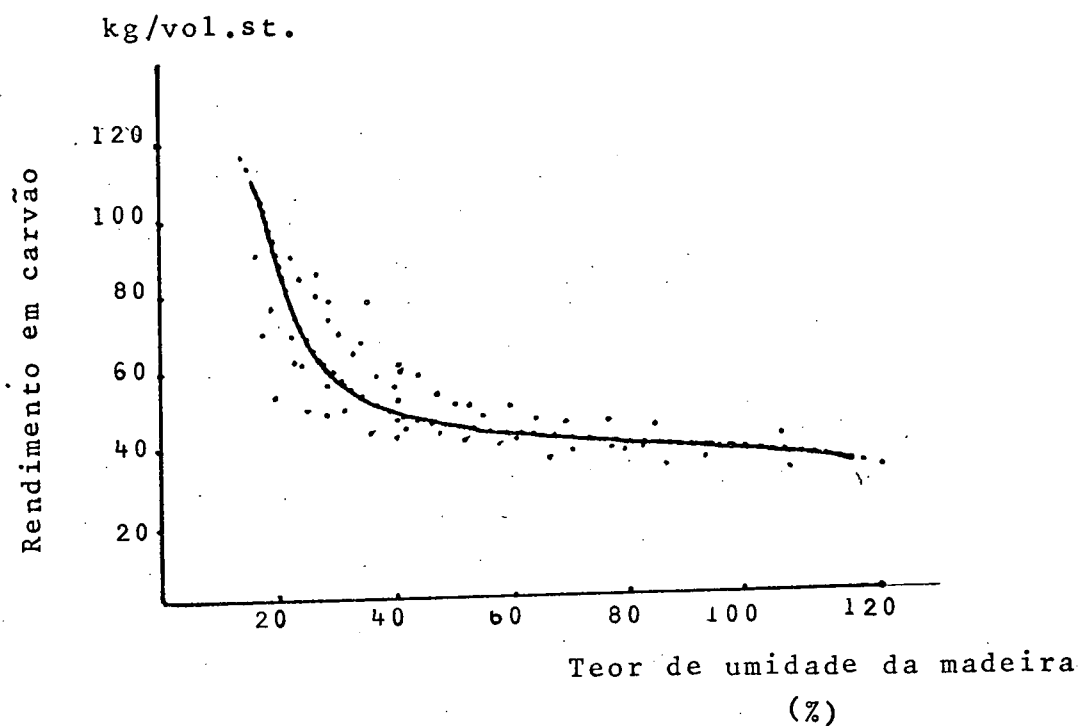
2.6. EFEITO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.

O teor de umidade é uma variável que também influencia na produção de carvão vegetal.

Segundo OLIVEIRA et alii²⁴, madeira com alto teor de umidade necessita de maior quantidade de energia para evaporar a água durante a carbonização, conseqüentemente, reduzindo o rendimento em peso do carvão.

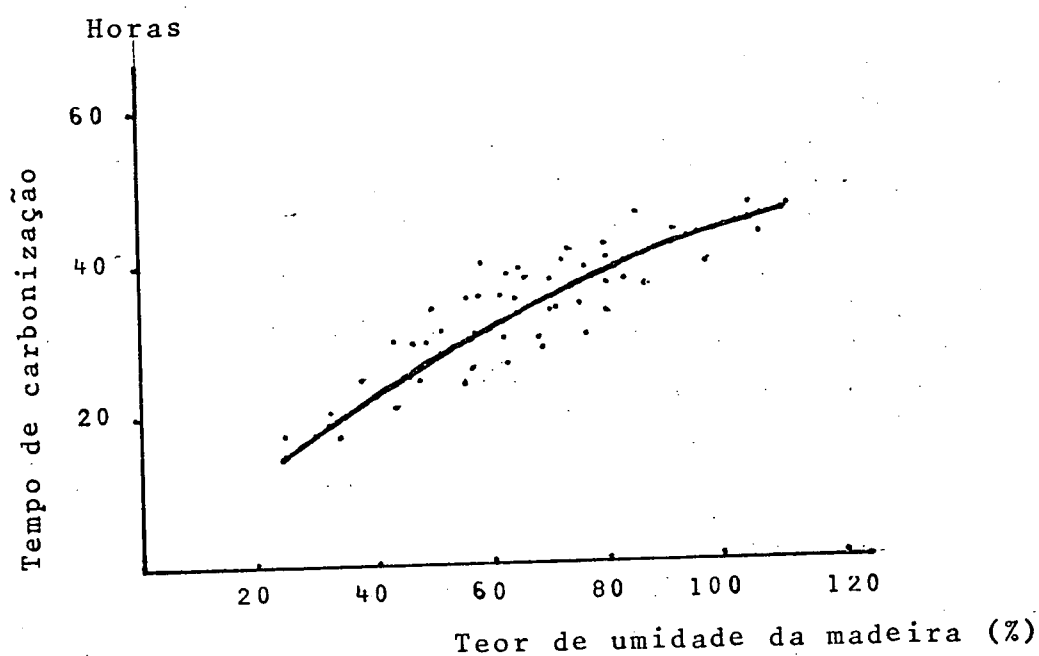
EARL⁹ ao carbonizar várias madeiras com diferentes teores de umidade, verificou que quanto maior a porcentagem dessa variável menor é a produção de carvão em kg/volume estêre, conforme mostra a figura 9. Outra observação feita por esse autor é que quanto maior o teor de umidade da madeira maior é o tempo de carbonização. A figura 10 demonstra esse aspecto.

Figura: 9. EFEITO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.



Fonte: EARL (1974)

Figura: 10. EFEITO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NO TEMPO DE CARBONIZAÇÃO.



Fonte: EARL (1974)

KARCHESY & KOCH¹⁶ também citam que o teor de umidade da madeira influencia na produção de carvão vegetal, bem como na qualidade e produção econômica.

Estudo de carbonização realizado com vinte espécies procedentes de Conceição do Araguaia indicou que para madeiras secas ao ar o rendimento médio foi de 26,75%; enquanto que para madeiras com 0% de umidade foi de 33,52%³⁴.

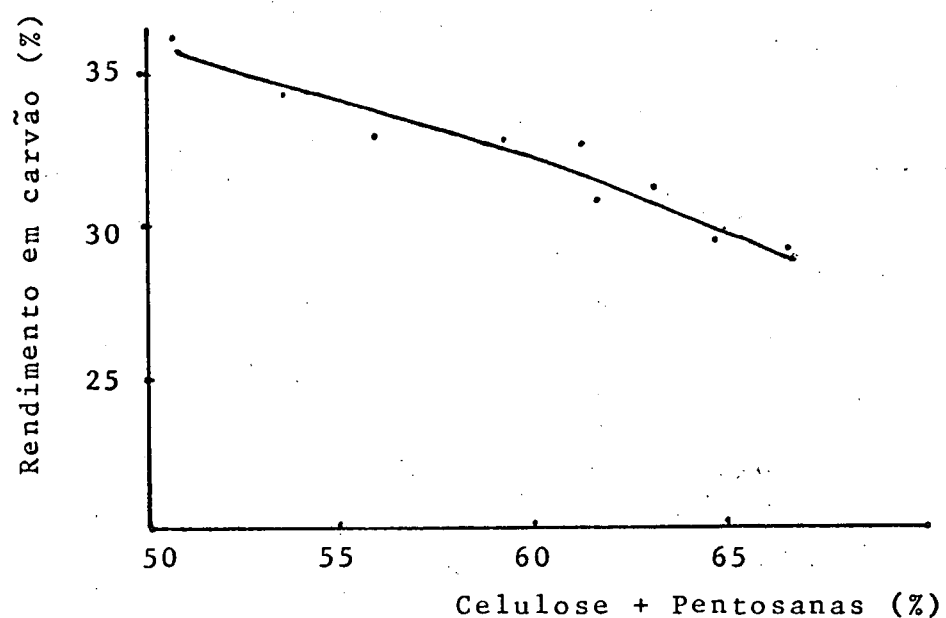
É importante, portanto, observar que o teor de umidade das peças de madeira a serem carbonizadas não devem apresentar grande diferença entre uma peça e outra.

2.7. OUTROS FATORES QUE AFETAM NAS DIVERSAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL.

Os constituintes químicos da madeira, sobretudo no tocante a celulose, as hemiceluloses, a lignina e os extrativos, influenciam no rendimento em carvão.

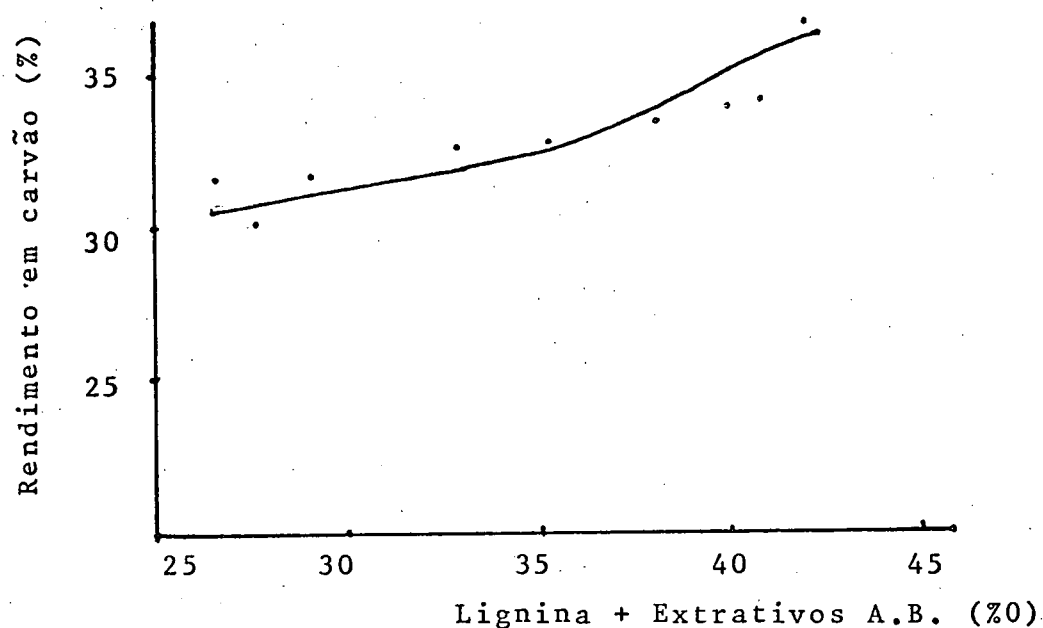
Quanto maior a porcentagem de celulose + pentosanas, menor é o rendimento. Por outro lado, quanto maior a porcentagem de lignina + extrativos, maior é o rendimento²⁵. Nas figuras 11 e 12, podem ser observadas essas tendências.

Figura: 11. VARIAÇÃO DO RENDIMENTO EM CARVÃO EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE CELULOSE + PENTOSANAS.



Fonte: Revue Bois et Forêts des Tropique (jan/fev., 1978)

Figura: 12. VARIAÇÃO DO RENDIMENTO EM CARVÃO EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE LIGNINA + EXTRATIVOS.



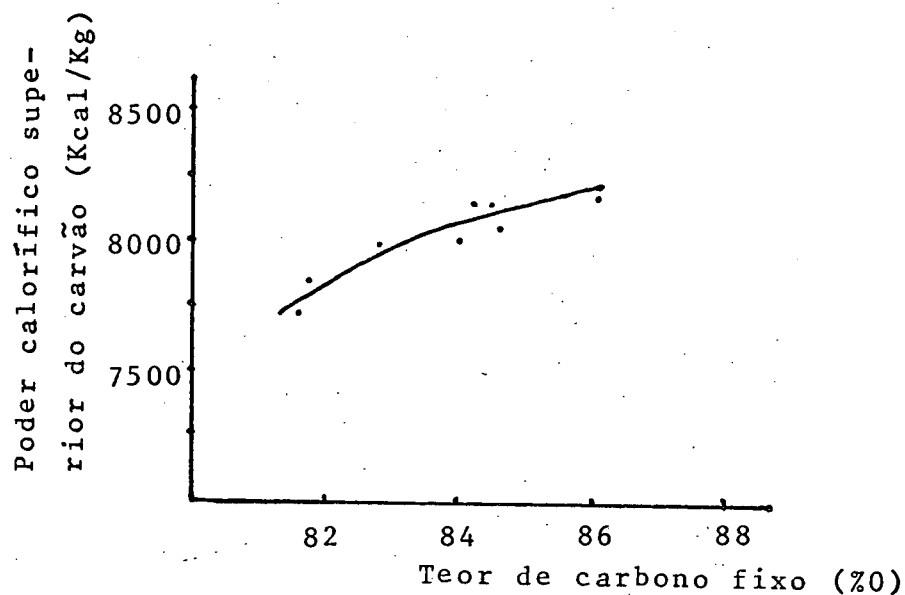
Fonte: Revue Bois et Forêts des Tropique (jan/fev., 1978)

Um outro aspecto importante é com relação a poder calorífico superior do carvão que é influenciado por teores de carbono fixo e materiais voláteis.

Segundo PETROFF & DOAT²⁵, o poder calorífico superior do carvão vegetal aumenta à medida que a porcentagem de carbono fixo se eleva, conforme visto na figura 13. Com relação a influência dos materiais voláteis no poder calorífico do carvão, esses autores observaram que os carvões que apresentaram as porcentagens na faixa de 13 a 14% desses produtos voláteis, liberaram maior quantidade de energia durante a combustão (figura 14).

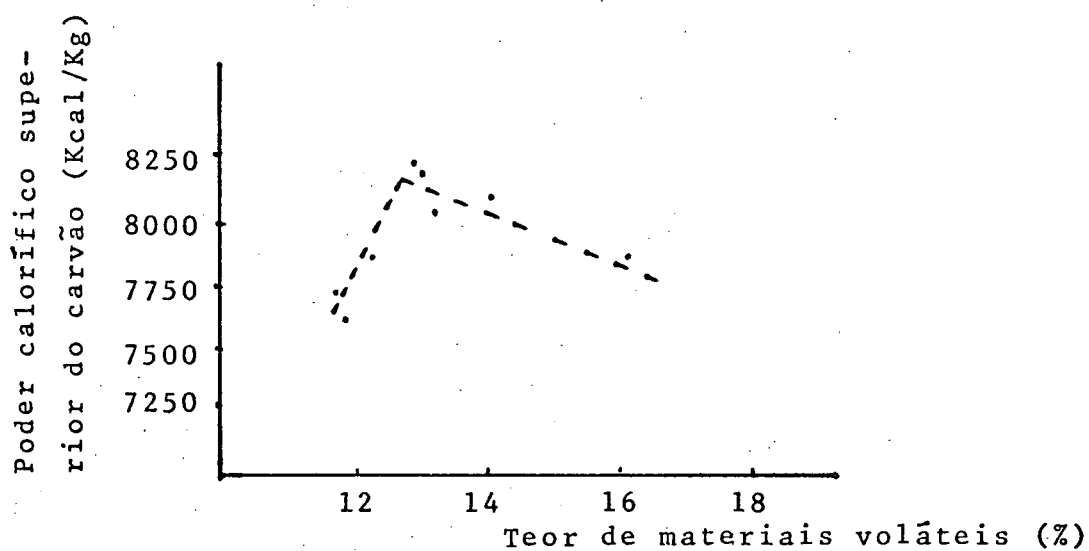
Esses resultados de PETROFF & DOAT²⁵, vem de certa forma reforçar as argumentações de OLIVEIRA et alii²⁴ e de SATONAKA²⁸, os quais citam que o poder calorífico do carvão vegetal atinge um valor máximo para os carvões produzidos numa faixa de temperatura de 500 a 600°C, que correspondem em temperaturas em que as porcentagens de materiais voláteis atingem em torno de 13%.

Figura: 13. VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO CARVÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO.



Fonte: Revue Bois et Forêts des Tropique (jan/fev.,1978)

Figura: 14. VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO CARVÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS.



Fonte: Revue Bois et Forêts des Tropique (jan/fev.,1978)

2.8. CARBONIZAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS.

As florestas tropicais representam, hoje, a mais exuberante fonte de material lenhoso, que está sendo consumida sob diversas formas.

No que tange a conversão de madeiras tropicais em carvão vegetal, especialmente da Amazônia, tem-se conhecimento de que alguns trabalhos foram realizados em escala laboratorial.

UHART³⁴ desenvolveu um trabalho sobre carbonização, utilizando-se madeiras da Amazônia em número de dezesseis espécies carbonizadas individualmente e em mistura. Nesse trabalho, foram estudadas as propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão.

DOAT & PETROFF⁸ efetuaram um estudo sobre carbonização de madeiras tropicais, no qual foram estudadas as propriedades do carvão vegetal.

PETROFF & DOAT²⁵ desenvolveram estudo sobre pirólise de madeiras tropicais, onde mostram a influência da composição química da madeira sobre os produtos da destilação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS.

3.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ORIGEM DAS MADEIRAS.

O material de estudo originou-se do planalto da Estação Experimental de Curuá-Una, pertencente a Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia-SUDAM, localizada no Estado do Pará, cujas as coordenadas são: Longitude - 54° e 24'W e Latitude 2° e 23' S. Esta estação dista do Município de Santarém cerca de 110 km, percorrendo 87 km o rio Amazonas no mesmo sentido de seu desaguamento e 23 km subindo o rio Curuá-Una (ANEXO 01 , figura 01).

A área da estação é cerca de 72.000 hectares, com cobertura vegetal caracterizada por uma floresta densa, típica da mata de terra firme. A região apresenta um clima com duas condições distintas: uma de chuva e uma outra de seca (em torno de seis meses cada), com índice pluviométrico médio anual de 2.500 mm. A altitude é de 100m, sendo ao longo dos rios de 60m. O solo do planalto é do tipo argiloso com ocorrência de manchas lateríticas. Nas áreas mais baixas é do tipo arenoso³¹.

O local foi escolhido, levando-se em consideração o estudo de exploração mecanizada da floresta tropical do planalto da Estação Experimental de Curuá-Una, empreendido por SUDAM³¹, que deixou um grande estoque de resíduos de madeira, sem uso de finido.

3.2. SELEÇÃO DAS MADEIRAS.

As espécies, objetos deste estudo, foram selecionadas com base: nas características de porte dominante destas espécies na região, refletindo em um considerável volume de madeiras de copas normalmente deixadas pela exploração florestal; na permanente procura destas madeiras no mercado madeireiro, consequentemente grande volume de madeiras exploradas, e na incidên

cia volumétrica individual de maior expressão, indicada no inventário pré-exploratório (ver Anexo 2, quadro 1) realizado por SUDAM³¹ na Estação Experimental de Curuã-Una.

Estas espécies selecionadas foram: *Dinizia excelsa*, *Ducke* (Angelim pedra), *Manilkara huberi*, (*Ducke*) Standl. (Maçaranduba) e *Goupia glabra*, Aubl. (Cupiuba).

3.3. COLETA DE MATERIAS

Os materiais empregados neste estudo foram provenientes da área descrita no item - 3.1., correspondentes às galharias da copa (ver Anexo 3, figura 2 e Anexo 4, figura 3), normalmente deixadas pela exploração florestal na região.

Após a identificação das árvores por número e por espécie e no mapa de exploração (ver Anexo 5, figura 4), foram sorteadas oito árvores de cada espécie, sendo coletadas duas amostras aleatoriamente das galharias de cada árvore, com diâmetro variando de 10 a 15 cm e comprimento de 50 cm. A coleta das amostras foi feita trinta dias após a derrubada. Essas amostras foram transportadas, primeiramente, à Santarém onde foram colocadas em uma estufa solar, visando a redução do teor de umidade; posteriormente foram transportadas à Belém e, finalmente, ao Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais da Universidade Federal do Paraná, onde foram realizados os estudos.

3.4. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.

A densidade básica da madeira foi determinada com base na Norma MB 1269/79 da ABNT (Associação Nacional de Normas Técnicas), através da seguinte fórmula:

$$D.bás. = \frac{Ps}{Vu}$$

onde,

D.bás. - densidade básica da madeira (g/cm³)

Ps - peso do corpo de prova completamente seco em estufa (g)

Vu - volume do corpo de prova completamente saturado

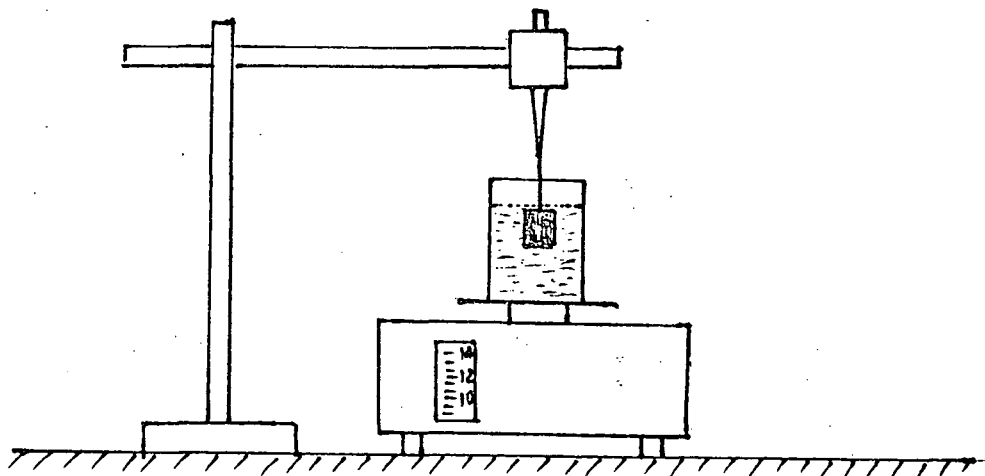
em água destilada (cm^3).

De cada árvore sorteada obteve-se o valor médio da densidade básica, utilizando-se cinco corpos de prova retirados aleatoriamente da amostra coletada, totalizando oito valores médios para cada espécie estudada.

O corpo de prova foi, primeiramente, submerso em água destilada até atingir a saturação. Esta condição de saturação foi verificada, efetuando-se pesagens diárias em uma balança analítica com precisão de 0,01 (um centêzimo) grama. A madeira foi considerada saturada no momento em que o peso do corpo de prova estabilizou-se em cinco pesagens consecutivas.

O volume do corpo de prova saturado foi determinado adotando-se o método recomendado por COPANT (Comissão Panamericana de Normas Técnicas) - COPANT 461, que consiste em submergir o corpo de prova em um recipiente com volume conhecido de água destilada, colocado sobre uma balança. A água deslocada pela madeira submersa é igual ao peso obtido na balança. A figura 15 mostra a metodologia empregada.

Figura: 15. DETERMINAÇÃO DO VOLUME POR MÉTODO DE PESAGEM.



Após a determinação do volume do corpo de prova, este, foi colocado em uma estufa com temperatura estabilizada a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingir o peso constante. A verificação da constância de peso foi feita diariamente da seguinte forma: - o corpo de prova era retirado da estufa e colocado em dessecador para esfriamento. Após isto, efetuava-se a pesagem utilizando-se uma balança analítica com precisão de 0,01 (um centêzimo) grama. No momento em que verificou-se a estabilização do peso em cinco pesagens consecutivas, então, considerou-se a madeira completamente seca.

Conseguidos os valores de peso e volume, a densidade básica da madeira foi determinada através da fórmula anteriormente apresentada.

3.5. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS NECESSÁRIAS AO ESTUDO COM BASE NA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.

Esta determinação consistiu na definição do número de amostras necessárias ao estudo das propriedades do carvão vegetal e da potencialidade energética da madeira, com base na densidade básica da madeira.

Foram considerados os oito valores de densidade básica de cada espécie e o limite de erro estabelecido foi de 10%.

O número de amostras necessárias foi determinado da seguinte forma:

$$N = \frac{s^2 \cdot t^2}{E^2}$$

onde,

- N - número de amostras necessárias (árvores)
- s^2 - variância
- t - valor de t tabelar com (n-1) grau de liberdade ao nível de 95% de probabilidade
- n - número inicial de amostras (árvores)
- E - erro, sendo que, $E = LE(\%) \cdot \bar{x}/100$
- Le - limite de erro = 10%
- \bar{x} - média da densidade básica da madeira obtida a partir dos oito valores determinados.

3.6. CARBONIZAÇÃO DAS MADEIRAS SELECIONADAS.

3.6.1. Preparo do material para a carbonização.

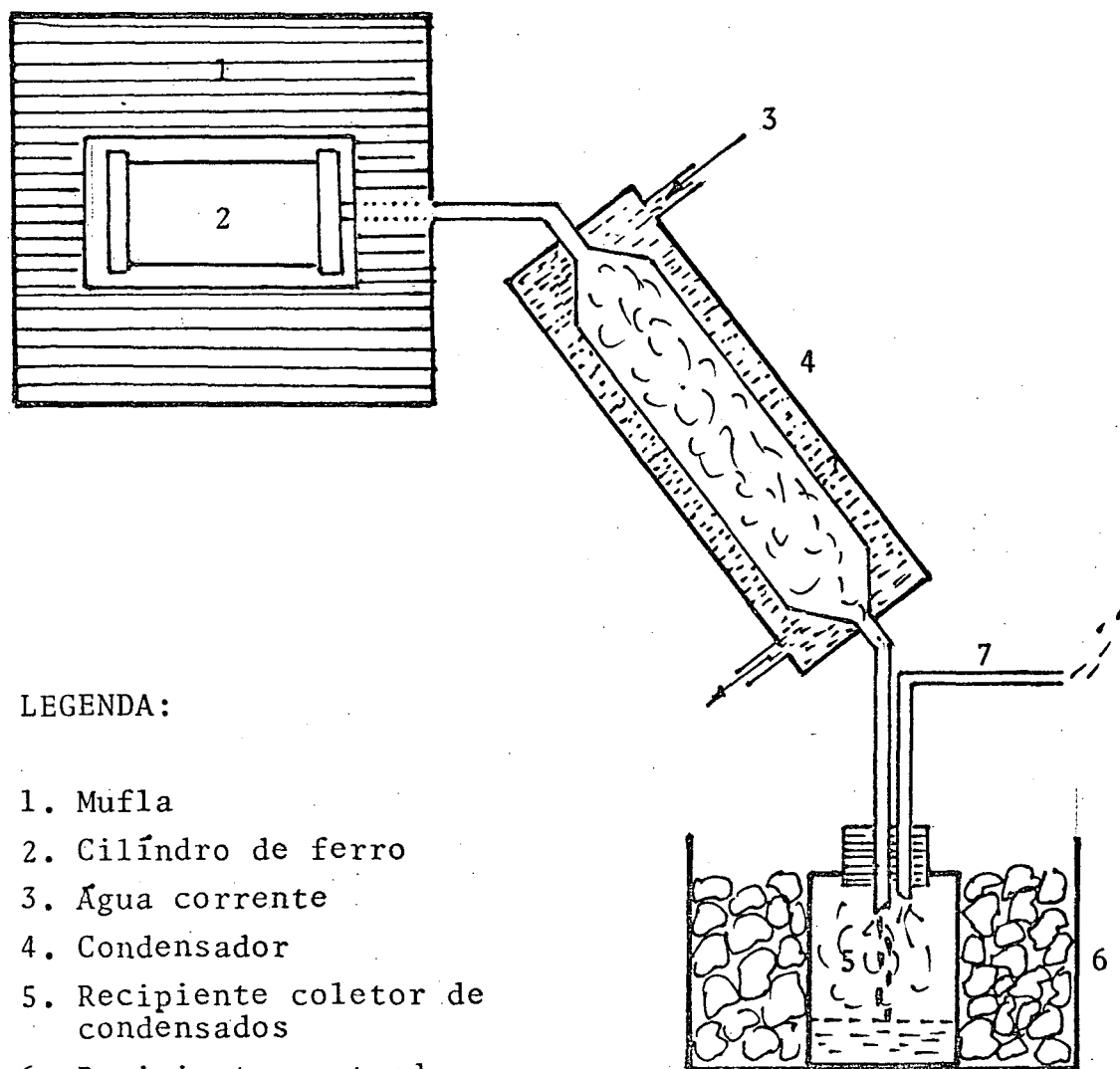
Todo o material restante do item - 3.4., foi transformado em corpos de prova com dimensões de 20 x 20 mm de secção transversal e 35 mm de comprimento, sem fazer distinção entre o alburno e cerne caso se fizessem presentes. Em seguida, do montante de corpos de prova obtidos de cada árvore, foram preparadas amostras cada uma contendo 10 (dez) corpos de prova que foram retirados aleatoriamente do montante anteriormente referido. Estas amostras foram devidamente codificadas de acordo com a árvore e a espécie. Depois estas amostras foram colocadas em uma câmara de climatização idêntica àquela recomendada pela COPANT (Comissão Panamericana de Normas Técnicas), COPANT -459. A finalidade deste acondicionamento foi homogeneizar o teor de umidade da madeira, visando com isto facilitar a secagem dos lotes de madeira para se obter o peso das amostras absolutamente secas em estufa com temperatura controlada a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

3.6.2. Produção de carvão vegetal.

A carbonização das madeiras selecionadas foi realizada em um forno (mufla), no qual foi introduzido um cilindro de ferro (retorta) dotado de um duto condutor dos gases liberados durante o processo de carbonização. A capacidade do cilindro foi de cerca de 250 cm³. No total foram realizadas noventa carbonizações, sendo trinta para cada espécie.

A figura 16 mostra o esquema do sistema de carbonização.

Figura: 16. ESQUEMA DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA



LEGENDA:

1. Mufla
2. Cilindro de ferro
3. Água corrente
4. Condensador
5. Recipiente coletor de condensados
6. Recipiente contendo gelo
7. Cano de evacuação de gases incondensáveis.

Os fatores de estudo, além das três espécies, foram: temperatura e o tempo de permanência no patamar final de carbonização. Para o fator temperatura foram estabelecidos três patamares finais com valores de 400°C , 600°C e 800°C , e para o fator tempo de permanência os valores adotados foram de 10 (dez) e 30 (trinta) minutos. Os patamares de temperatura foram estabelecidos, tendo em vista que, nessa faixa ocorrem variações bastante importantes nas propriedades do carvão. Com relação ao tempo de permanência, os valores adotados foram definidos tomando-se como base o estudo realizado por NANASSY & FUNG²¹, onde é mostrado que a partir de 400°C a perda de massa do material carbonizado tende a se estabilizar após trinta minutos de permanência no respectivo patamar final de carbonização.

A temperatura final de carbonização foi controlada através de termostato e programada conforme a figura 17. As razões do estabelecimento dos dois primeiros patamares foram decorrentes a importância dessas temperaturas na carbonização da madeira. O primeiro patamar foi para evitar a exposição brusca da madeira ao calor, e o segundo, considerando que nesse patamar inicia-se a reação exotérmica, fase na qual "são liberadas cerca de 210 calorias por quilo de madeira"³⁴.

A carbonização foi considerada terminada, no momento em que o tempo de permanência no patamar final foi atingido, desligando-se, então, o aparelho.

Para o esfriamento do carvão, o cilindro de ferro era retirado do forno, tendo-se o cuidado de vedar o duto de saída de gases com um tampão de madeira para evitar a entrada de ar. Após o esfriamento, o carvão era removido do cilindro e armazenado em saco plástico, para posterior uso.

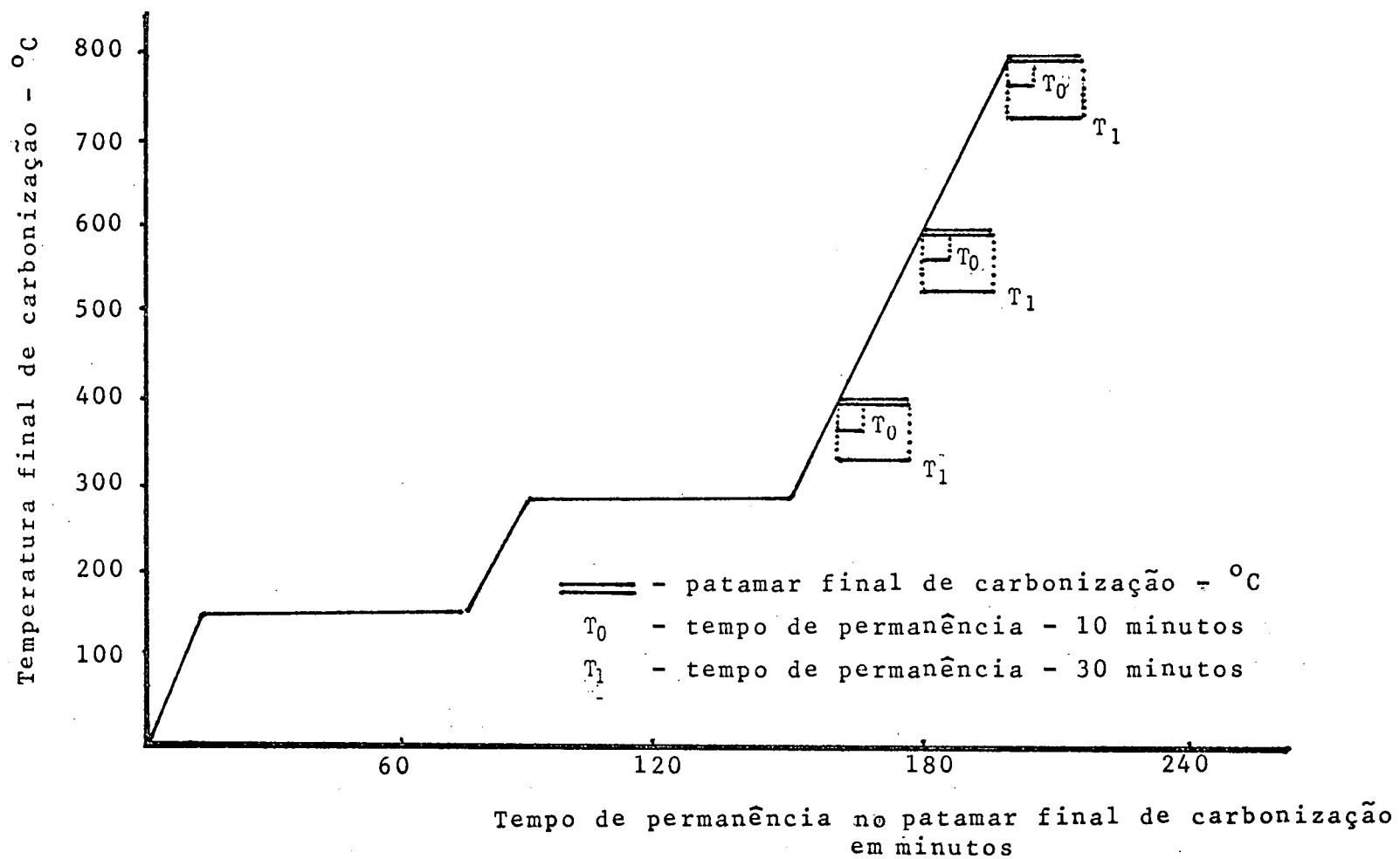


Figura: 17. ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA ATÉ O PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO. FI-

3.7. ESTUDOS DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO.

Os estudos das propriedades do carvão vegetal corresponderam a: rendimento gravimétrico; densidade aparente; poder calorífico superior e análises químicas imediatas concernentes a teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

3.7.1. Rendimento gravimétrico do carvão (base seca).

Foi determinado pelo quociente entre o peso do carvão seco e o peso da madeira seca enforcada.

O peso da amostra de madeira (seca) foi determinado no item - 3.6.(a).

O material carbonizado, referido no item - 3.6.(b), foi colocado em uma estufa com temperatura controlada a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$, até atingir o peso constante. O rendimento em carvão foi determinado através da seguinte fórmula:

$$\text{RG(b.s.)} = \frac{\text{Peso do carvão seco em estufa}}{\text{Peso da madeira seca em estufa}} \times 100$$

onde,

RG(b.s.) - rendimento gravimétrico do carvão (base seca), em %.

3.7.2. Densidade aparente do carvão.

Foram feitas cinco determinações por tratamento, mediante a adaptação da Norma MB 1269/79 da ABNT, que trata da determinação de densidade básica da madeira, através da seguinte fórmula:

$$\text{D.ap.carvão} = \frac{\text{Peso do carvão seco em estufa}}{\text{Volume do carvão saturado}}$$

onde,

D.ap.ca-vão - densidade aparente do carvão (g/cm^3)

O peso e o volume foram determinados da mesma forma especificada no item - 3.4., respectivamente, com exceção da dimensão do corpo de prova que foi de aproximadamente 1000 mm^3 .

Devido a dificuldade de se obter o volume exato do carvão em estado anidro, optou-se pela saturação do mesmo. O método

do de saturação do carvão foi o mesmo adotado no item - 3.4. , para madeira.

3.7.3. Análises químicas imediatas do carvão.

Todo material restante, especificado no item - 3.4.(a) , devidamente codificado por árvore e por espécie, foi transformado em partículas por meio de processo manual, utilizando-se o gral.

As análises consistiram na quantificação da porcentagem de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, com base na Norma ASTM (American Society for Testing and Material) D 1762/64.

3.7.3.1. Teor de materiais voláteis.

O teor de materiais voláteis foi determinado através da seguinte fórmula:

$$M.V. = \frac{Ps - Ps(950^{\circ}C)}{Ps} \times 100$$

onde,

- M.V. - teor de materiais voláteis, (%)
- Ps - peso das partículas de carvão seco em estufa à $103^{\circ} \pm 2^{\circ}C$, (g)
- Ps(950 $^{\circ}C$) - peso das partículas de carvão submetido à 950 $^{\circ}C$, (g).

3.7.3.2. Teor de cinzas.

O teor de cinzas foi determinado através da seguinte fórmula:

$$Tci. = \frac{Pci}{Ps} \times 100$$

onde,

- Tci. - teor de cinzas, (%)
- Pci. - peso do material incenerado (cinzas), (g)
- Ps - peso das partículas de carvão seco em estufa à $103^{\circ} \pm 2^{\circ}C$, (g)

3.7.3.3. Teor de carbono fixo.

O teor de carbono fixo foi determinado através da seguinte fórmula:

$$C.F. = 100\% - (\%M.V. + \%Tci.)$$

onde,

C.F. - teor de carbono fixo, (%)

M.V. - teor de materiais voláteis, (%)

Tci. - teor de cinzas, (%)

3.7.4. Poder calorífico superior do carvão.

Para a determinação do poder calorífico superior do carvão, adotou-se a Norma ASTM D 250/50. Para tal, foi utilizado um calorímetro baseado no método de Berttelot, que consiste na combustão do material em um ambiente fechado, na presença de oxigênio e sob pressão.

3.8. ESTUDO SOBRE A POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA CONVERTÍVEL EM CARVÃO.

A potencialidade energética da madeira foi caracterizada com base em dois parâmetros: rendimento gravimétrico e poder calorífico superior do carvão. A sua determinação foi feita através da seguinte fórmula:

$$P.E. = RG(b.s) \times PCS$$

onde,

P.E. - potencialidade energética da madeira em (kjoule/Kg de madeira)

RG(b.s) - rendimento gravimétrico do carvão, em %.

PCS - poder calorífico superior do carvão em (kjoule/kg de carvão)

Além deste aspecto da potencialidade energética por quilograma de madeira, foi feito estudo sobre a estimativa da potencialidade energética da madeira por área (kjoule/hectare), com base

se na seguinte expressão:

$$P.E.(ha) = P.E. \times R$$

onde,

P.E.(ha) - potencialidade energética da madeira por área, em kjoule/hectare.

P.E. - potencialidade energética por quilo de madeira, em kjoule/kg.

R - resíduos de madeira por área = a.b.c.d*, em Kg/ha).

* a - volume médio de madeiras exploradas na área (m³/ha).

* b - rendimento em madeira serrada, em %.

* c - relação: madeira serrada/resíduos na mata (1 m³ de madeira serrada \approx 8 m³ de resíduos, segundo JANKAUSKIS¹⁵).

* d - densidade básica da madeira (g/cm³).

3.9. ANÁLISES ESTATÍSTICAS.

As variáveis de resposta foram analisadas, aplicando-se o Delineamento Completamente ao Acaso, em arranjos fatoriais de 3² x 2, seguindo-se a metodologia de STELL & TORRIE³⁰.

Inicialmente foi realizado o teste de BARTLETT para verificar a homogeneidade de variâncias, e em seguida, foram feitos testes de Análise de Variância e teste de significância pelo método de SNK ao nível de 1% de probabilidade.

Os fatores e os níveis adotados foram:

FATORES	NÍVEIS	ESPECIFICAÇÃO
A(espécie)	a ₀ a ₁ a ₂	<i>Dinizia excelsa</i> , Ducke (AP)* <i>Manilkara huberi</i> , (Ducke) Standl. (M)* <i>Goupia glabra</i> , Aubl. (C)*
B (tempo de permanência no patamar final de carbonização)	b ₀ b ₁	10(dez) minutos 30(trinta) minutos
C (temperatura final de carbonização)	c ₀ c ₁ c ₂	400°C 600°C 800°C

** (AP) - Angelim pedra

* (M) - Maçaranduba

* (C) - Cupiuba

O número de repetições por tratamento de cada propriedade estudada, foi estabelecido com base no número de amostras necessárias ao estudo da densidade básica da madeira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.

No Quadro 13, encontram-se as médias de densidade básica da madeira, os valores mínimo e máximo, as estimativas de desvio padrão e coeficiente de variação. Observa-se que as amplitudes de variações das três espécies foram pequenas, bem como os coeficientes de variação.

Quadro: 13. MÉDIAS, AMPLITUDES DE VARIAÇÃO, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.

Madeira	Médias de Densidade básica (g/cm ³)	Amplitude da Densidade básica.		Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
		Mín.	Máx.		
Angelim pedra	0,85	0,75	0,93	0,0649	7,6
Maçaranduba	0,84	0,78	0,94	0,0652	7,7
Cupiuba	0,73	0,65	0,82	0,0650	8,8

As madeiras de Angelim pedra e Maçaranduba apresentaram-se mais pesadas em relação a de Cupiuba, aliás, expectativa esta já esperada, vindo assim confirmar os resultados encontrados por SUDAM³²

Considerando-se que madeira com densidade básica elevada, resulta em carvão denso⁸, pode-se concluir que as madeiras estudadas apresentam indicativos de boas qualidades para produção de carvão vegetal.

4.2. NÚMERO DE AMOSTRAS NECESSÁRIAS AO ESTUDO.

No quadro 14, encontra-se o número de amostras necessárias (N), considerando-se o limite de erro de 10%, calculado com base na variância obtida na determinação da densidade básica da madeira. Apresenta-se ainda o número de amostras adotadas no estudo.

Quadro 14. Nº DE AMOSTRAS NECESSÁRIAS AO ESTUDO.

Espécie	(N) calculado	(N) definitivo
<i>Dinizia excelsa</i> , Ducke (Angelim pedra)	3,25	5
<i>Manilkara huberi</i> , (Ducke) Standl. (Maçaranduba)	3,35	5
<i>Goupia glabra</i> , Aubl. (Cupiuba)	4,41	5

Com base nos resultados encontrados, fixou-se em 5 (cinco), o número de amostras necessárias ao estudo. Este número foi baseado no N da espécie *Goupia glabra*, Aubl., que apresentou o maior valor (4,41 árvores). Para os estudos das propriedades do carvão e da potencialidade energética da madeira adotou-se o N(número de amostras) como sendo o número de repetições por cada tratamento.

4.3. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO (base seca).

As médias de rendimento gravimétrico são apresentadas no quadro 15. Como pode ser observado, a expectativa de diminuição do rendimento em função do aumento da temperatura foi confirmada, vindo assim ao encontro dos resultados mostrados por OLIVEIRA et alii²⁴, HARRIS¹³, VEADO et alii³⁵ e outros. A razão da redução do rendimento gravimétrico do carvão face o aumento da temperatura final de carbonização, pode ser explicada com base na teoria de carbonização da madeira. Quanto maior é a temperatura de carbonização, maior é o grau de destilação da madeira¹²⁴. Isto provoca logicamente a perda de massa do material carbonizado, causando com isto a diminuição de seu peso.

Quadro: 15. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO (base seca) A DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM (%).

Temperatura final de carbonização em °C	M A D E I R A					
	Angelim pedra		Maçaranduba		Cupiuba	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em minutos.					
	10	30	10	30	10	30
400	44,7	44,0	44,5	40,3	38,5	34,7
600	34,5	34,3	30,5	30,3	29,7	28,9
800	29,6	29,2	28,7	28,0	27,6	26,9

Com relação a tempo de permanência no patamar final de carbonização, observou-se que apenas as madeiras de Maçaranduba e Cupiuba sofreram redução importante quando carbonizadas sob temperatura de 400°C. Nas outras condições praticamente não houve reduções.

Sob o ponto de vista global, observa-se na figura 18, que o efeito da temperatura final de carbonização sobre o rendimento gravimétrico do carvão, foi muito mais marcante do que o efeito do tempo de permanência no patamar final de carbonização.

Essas observações evidenciam claramente que a variação do rendimento em peso do carvão, tem relação direta com a quantidade de materiais volatilizados durante o processo de carbonização. Isto vem ao encontro da afirmação de GOMES & OLIVEIRA¹² os quais citam que o rendimento em carvão está em função do grau de destilação que a madeira sofre durante a carbonização.

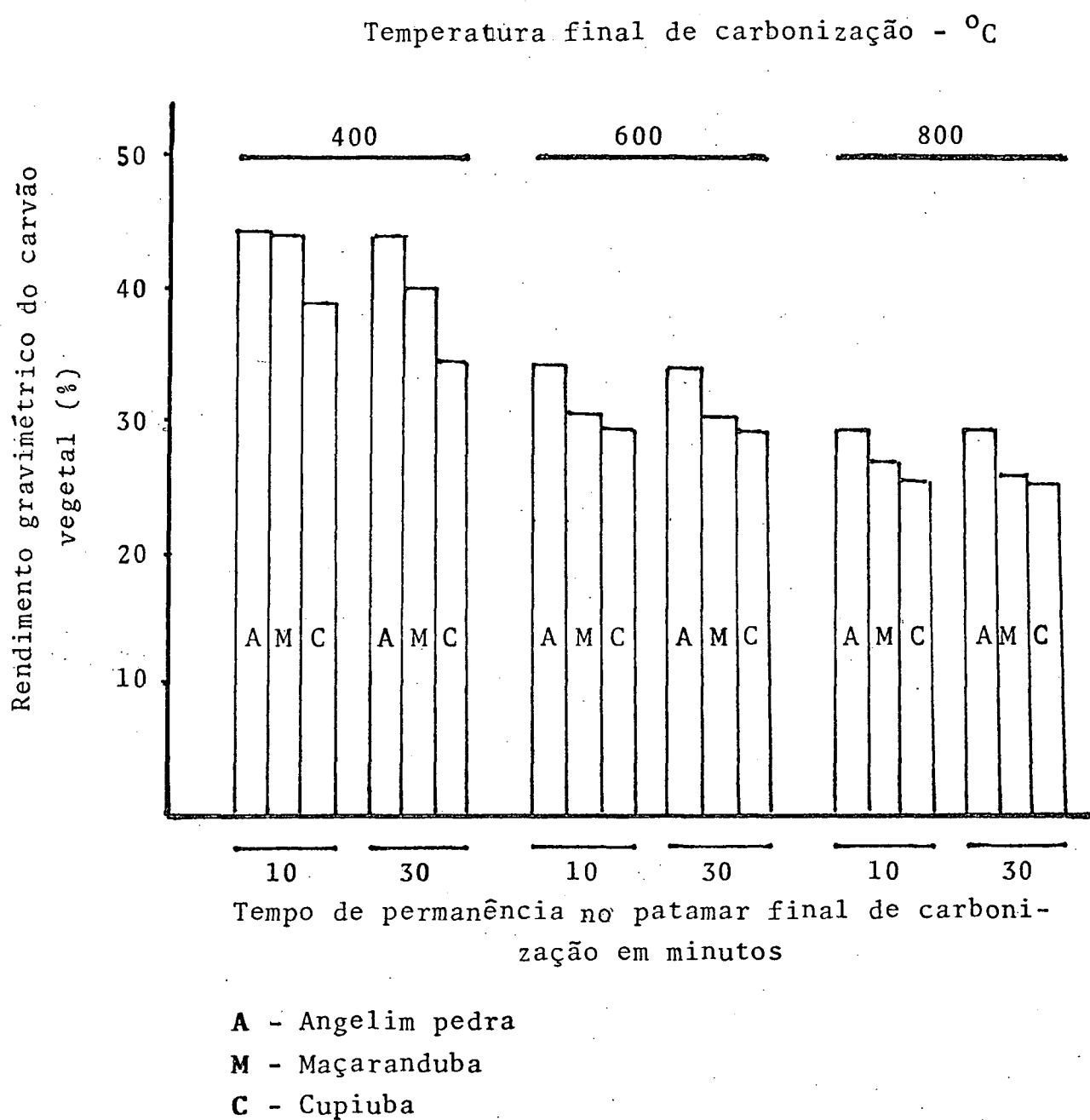
Um outro aspecto a ser considerado é a variação do rendimento em peso do carvão em função dos constituintes químicos da madeira. BEALL³ mostra que a degradação térmica está em função dos principais compostos químicos, ou seja, celulose, hemiceluloses e lignina. Esta afirmação é concordada em parte por PETROFF & DOAT²⁵, os quais mostram que o rendimento em carvão depende da quantidade de celulose, pentosanas, lignina e extrativos álcool/benzeno.

Tudo isto somado com os presentes resultados, permite concluir que o comportamento diferenciado das espécies, possivelmente tenha sido causado pela variação percentual de cada um deles reagir diante ao calor.

Para as condições em que foi desenvolvido o estudo, os resíduos de madeira de Angelim pedra e Maçaranduba apresentam indicativos de melhores madeiras para produção de carvão, superando o rendimento obtido por outros pesquisadores como HARRIS¹³ que carbonizou madeiras de eucaliptos da Austrália e OLIVEIRA et alii²³ que carbonizaram madeiras de *Eucalyptus grandis*, W.Hill.

A madeira de Cupiuba embora tenha apresentado rendimento em peso do carvão inferior que o de Angelim pedra e Maçaranduba ainda pode ser considerada uma matéria prima satisfatória para tal finalidade, equivalendo-se às madeiras de eucaliptos.

Figura: 18. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO (base seca), A DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM (%).



As análises estatísticas dos resultados obtidos são mostradas a seguir.

O teste de BARTTLET (ANEXO 6, quadro 2) indicou que existe homogeneidade de variâncias dos tratamentos aplicados, validando portanto a aplicabilidade da análise de variância (ANEXO 7, quadro 3). Os resultados indicam que existem diferenças altamente significativas entre as espécies (fator A), os tempos de permanência (fator B), as temperaturas (fator C) e as respectivas interações.

O teste de significância realizado através do método de SNK, ao nível de 1% de probabilidade é mostrado no quadro 16.

QUADRO: 16. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO PELO MÉTODO SNK A 1% DE PROBABILIDADE.

Tratamen- tos	\bar{x} %	T1	T3	T2	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T13	T14	T12	T15	T16	T17	T18
		400/10 A	400/10 M	400/30 A	400/30 M	400/10 C	400/30 C	600/10 A	600/30 A	600/10 M	600/30 M	600/10 C	800/10 A	800/30 A	600/30 C	800/10 M	800/30 M	800/10 C	800/30 C
		44,7	44,5	44,0	40,3	38,5	34,7	34,5	34,3	30,5	30,3	29,7	29,6	29,2	28,9	28,7	28,0	27,6	26,9
T18	26,9	17,8**	17,6**	17,1**	13,4**	11,6**	7,8**	7,6**	7,4**	3,6**	3,4**	2,8**	2,7**	2,3**	2,0**	1,8**	1,1**	0,7 ^{ns}	-
T17	27,6	17,1**	16,9**	16,4**	12,7**	10,9**	7,1**	6,9**	6,7**	2,9**	2,7**	2,1**	2,0**	1,6**	1,4**	1,1**	0,4 ^{ns}	-	-
T16	28,0	16,7**	16,5**	16,0**	12,3**	10,5**	6,7**	6,5**	6,3**	2,5**	2,3**	1,7**	1,4**	1,2**	0,9 ^{ns}	0,6 ^{ns}	-	-	-
T15	28,7	16,0**	15,8**	15,3**	11,6**	9,8**	6,0**	5,8**	5,6**	1,8**	1,6**	1,0 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,2 ^{ns}	-	-	-	-
T12	28,9	15,8**	15,6**	15,1**	11,4**	9,6**	5,8**	5,6**	5,4**	1,6**	1,4**	0,8 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,3 ^{ns}	-	-	-	-	-
T14	29,2	15,5**	15,3**	14,8**	11,1**	9,3**	5,5**	5,3**	5,1**	2,3**	1,1 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}	-	-	-	-	-	-
T13	29,6	15,1**	14,9**	14,4**	10,7**	8,9**	5,1**	4,9**	4,7**	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,1 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-
T11	29,7	15,0**	14,8**	14,3**	10,6**	8,8**	5,0**	4,8**	4,6**	0,8 ^{ns}	0,6 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-
T10	30,3	14,4**	14,2**	13,7**	10,0**	8,2**	4,4**	4,2**	4,0**	0,2 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T9	30,5	14,2**	14,0**	13,5**	9,8**	8,0**	4,2**	4,0**	3,8**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	34,3	10,4**	10,2**	9,7**	6,0**	4,2**	0,4 ^{ns}	0,2 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T7	34,5	10,2**	10,0**	9,5**	5,8**	4,0**	0,2 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	34,7	10,0**	9,8**	9,3**	5,6**	3,8**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T5	38,5	6,2**	6,0**	5,5**	1,8**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T4	40,3	4,4**	4,2**	3,7**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	44,0	0,7 ^{ns}	0,5 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3	44,5	0,2 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T1	44,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

400, 600 e 800 - Temperaturas finais de carbonização, em °C
10 e 30 - Tempos de permanência no patamar final de carbonização, em minutos
A - Angelim pedra
M - Maçaranduba
C - Cupiuba

COMPARADOR SNK AO NÍVEL DE 1% DE PROBABILIDADE

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Comp.	0,97	1,10	1,18	1,24	1,28	1,32	1,35	1,38	1,40	1,42	1,44	1,46	1,47	1,48	1,50	1,51	1,52

Com base no teste de significância pode-se fazer uma análise do comportamento das espécies diante dos fatores temperatura e tempo de permanência no patamar final de carbonização.

Observa-se que a redução do rendimento em carvão a cada aumento de 200°C na temperatura final de carbonização, é altamente significativa para as espécies estudadas. Com relação ao fator tempo de permanência verificou-se um efeito significativo apenas às madeiras de Maçaranduba e Cupiuba, quando carbonizadas sob 400°C .

4.4. DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO.

As médias de densidade aparente do carvão encontram-se contidas no quadro 17. Como pode ser observado, a expectativa de se obter carvão denso a partir de madeira densa foi confirmada, vindo assim, ao encontro dos resultados de DOAT & PETROFF⁸, os quais defendem que quanto maior a densidade da madeira maior é densidade do carvão.

Sob o aspecto geral, observa-se que os carvões produzidos sob temperatura de 600°C , independentemente da espécie e do tempo de permanência no patamar final de carbonização, apresentaram uma ligeira diminuição de suas densidades. Esta particularidade também foi verificada por SLOCUM et alii²⁹, BLANKENHORN et alii⁶ e MENDES et alii²⁰. As literaturas não são explícitas a respeito do assunto. Porém, considerando-se que a densidade é obtida pela razão entre o peso do carvão e o seu respectivo volume, deduz-se que, nessa temperatura o efeito da perda de massa (perda de peso) seja maior do que o efeito da contração volumétrica sofrida pelo carvão durante o processo de carbonização.

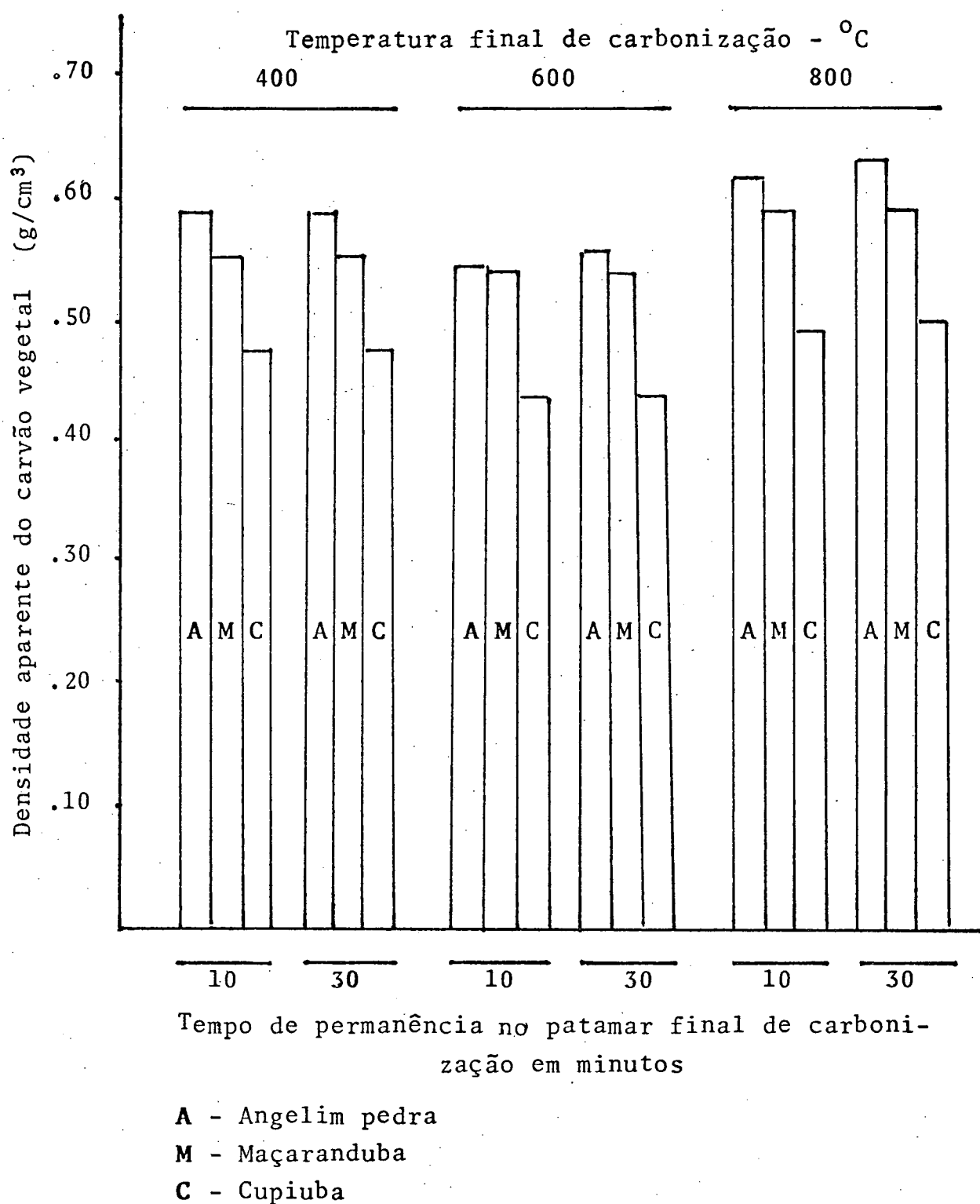
No tocante a tempo de permanência observou-se que este fator não proporcionou um efeito significativo sobre a densidade, fato este, possivelmente causado pela proporcionalidade de variação entre o peso e o volume do carvão durante o processo de carbonização.

Na figura 19 pode ser constatada que a variação da densidade do carvão é função praticamente só da temperatura de carbonização.

Quadro: 17. DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO, A DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM g/cm³.

	M A D E I R A					
	Angelim pedra		Maçaranduba		Cupiuba	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em minutos					
	10	30	10	30	10	30
400	0,59	0,59	0,56	0,56	0,48	0,48
600	0,55	0,56	0,54	0,54	0,44	0,44
800	0,62	0,63	0,58	0,59	0,49	0,50

Figura: 19. DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO, EM DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM g/cm^3 .



Entre as madeiras estudadas faz-se destaque ao Angelim pedra e a Maçaranduba por apresentarem carvões bastante densos. Como era de se esperar, o carvão produzido com madeira de Cupiuba que apresenta densidade menor que as madeiras antes citadas, resultou em carvão menos pesado, vindo assim confirmar os resultados de DOAT & PETROFF²⁵, os quais mostram que a densidade do carvão é proporcional a densidade da madeira.

As análises estatísticas dos resultados são mostradas a seguir:

O teste de BARTTLET (ANEXO 8, quadro 4), indica que existe homogeneidade de variâncias dos tratamentos aplicados.

A análise de variância (ANEXO 9, quadro 5), revela que os tratamentos; os fatores Espécies (A) e Temperaturas (C), e as interações A x C e A x B x C apresentam diferenças significantes ao nível de 1% de probabilidade. O fator tempo (B) e as interações A x B e B x C não apresentam diferenças significativas ao nível da probabilidade citada.

O teste de significância é mostrado no quadro 18. Com base nesse teste pode-se fazer uma análise do comportamento das madeiras em relação ao fator temperatura de carbonização. O aumento na temperatura final de carbonização causa em geral um efeito significativo sobre a densidade do carvão.

QUADRO: 18. TESTE DE SIGNIFICANCIA DA DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO PELO METODO SNK A 1% DE PROBABILIDADE.

Tratamen- tos	T14	T13	T16	T1	T2	T15	T8	T3	T4	T7	T9	T10	T18	T17	T5	T6	T11	T12
	600/30 A	600/10 A	800/30 M	400/10 A	400/30 A	800/10 M	600/30 A	400/10 M	600/30 M	600/10 A	600/10 M	600/30 M	800/30 C	800/10 C	400/10 C	400/30 C	600/10 C	600/30 C
$\bar{x}(\%)$	0,63	0,62	0,59	0,59	0,59	0,58	0,56	0,56	0,56	0,55	0,54	0,54	0,50	0,49	0,48	0,48	0,44	0,44
T12	0,44	0,19**	0,18**	0,15**	0,15**	0,15**	0,14**	0,12**	0,12**	0,12**	0,11**	0,10**	0,10**	0,06**	0,05**	0,04**	0,04**	0,00 ^{ns}
T11	0,44	0,19**	0,18**	0,15**	0,15**	0,15**	0,14**	0,12**	0,12**	0,12**	0,11**	0,10**	0,10**	0,06**	0,05**	0,04**	0,04**	-
T6	0,48	0,15**	0,14**	0,11**	0,11**	0,11**	0,10**	0,08**	0,08**	0,08**	0,07**	0,06**	0,06**	0,02**	0,02**	0,01 ^{ns}	-	-
T5	0,48	0,15**	0,14**	0,11**	0,11**	0,11**	0,10**	0,08**	0,08**	0,08**	0,07**	0,06**	0,06**	0,02**	-	-	-	-
T17	0,49	0,14**	0,13**	0,10**	0,10**	0,10**	0,09**	0,07**	0,07**	0,07**	0,06**	0,05**	0,05**	-	-	-	-	-
T18	0,50	0,13**	0,12**	0,09**	0,09**	0,09**	0,08**	0,06**	0,06**	0,06**	0,05**	0,04**	-	-	-	-	-	-
T10	0,54	0,09**	0,08**	0,05**	0,05**	0,05**	0,04**	0,02**	0,02**	0,02**	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-	-	-	-	-	-
T9	0,54	0,09**	0,08**	0,05**	0,05**	0,05**	0,04**	0,02**	0,02**	0,02**	0,01 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-
T7	0,55	0,08**	0,07**	0,04**	0,04**	0,04**	0,03**	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-
T4	0,56	0,07**	0,06**	0,03**	0,03**	0,03**	0,02**	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3	0,56	0,07**	0,06**	0,03**	0,03**	0,03**	0,02**	0,00 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	0,56	0,07**	0,06**	0,03**	0,03**	0,03**	0,02**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T15	0,58	0,05**	0,04**	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	0,59	0,04**	0,03**	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T1	0,59	0,04**	0,03**	0,00 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T16	0,59	0,04**	0,03**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T13	0,62	0,01 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T14	0,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

400, 600 e 800 - Temperaturas finais de carbonização, em °C

10 e 30 - Tempos de permanência no patamar final de carbonização, em minutos

A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

COMPARADOR SNK AO NÍVEL DE 1% DE PROBABILIDADE

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Comp.	0,015	0,018	0,019	0,02	0,02	0,021	0,022	0,022	0,023	0,023	0,023	0,024	0,024	0,024	0,024	0,025	0,025

4.5. ANÁLISES QUÍMICAS IMEDIATAS DO CARVÃO.

No quadro 19, acham-se contidos os resultados das análises químicas imediatas do carvão à base seca. Como pode ser observado, os teores de carbono fixo e materiais voláteis variam, principalmente com a alteração da temperatura final de carbonização, aliás expectativa esta já esperada, confirmando os resultados de outros pesquisadores como OLIVEIRA et alii²⁴, MENDES et alii²⁰, HARRIS¹³ e WENZL³⁶.

Quanto maior a temperatura de carbonização, maior é o grau de destilação da madeira (GOMES & OLIVEIRA¹²), refletindo portanto em menor quantidade de materiais voláteis remanescentes no carvão, em contrapartida, maior o acúmulo de carbono fixo. Isto pode ser visualizado nas figuras 20 e 21.

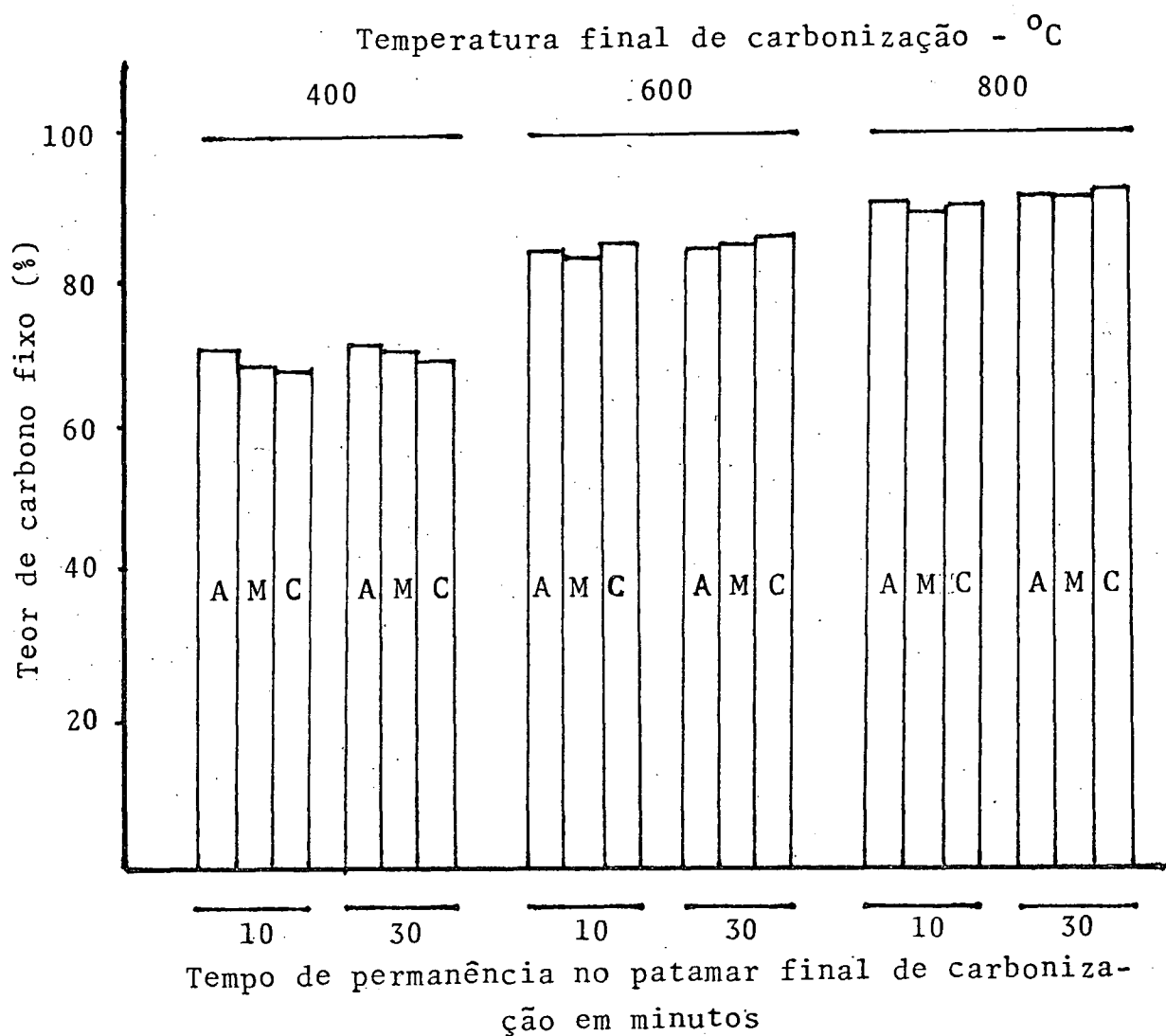
Analizando-se o aspecto da quantidade de carbono fixo, verificou-se um aumento médio de 15,10%, quando a temperatura de carbonização passou de 400°C para 600°C; enquanto que a passagem de 600°C para 800°C acarretou um aumento médio de apenas 6,34%. A variação total obtida entre os carvões produzidos sob temperaturas extremas (400°C e 800°C) foi de 21,44%. O pequeno aumento de carbono fixo obtido com o carvão produzido sob 800°C em relação ao de 600°C, veio concordar com a posição de WENZL o qual mostra que o teor de carbono fixo aumenta muito pouco para temperaturas superiores a 700°C.

A quantidade de materiais voláteis teve uma redução média de 15,19%, quando a temperatura passou de 400°C para 600°C; e de apenas 6,38% quando passou de 600°C para 800°C. A variação total obtida entre as temperaturas extremas (400°C e 800°C) foi de 21,56%. A pequena diminuição de materiais voláteis verificada com o carvão produzido sob 800°C em relação ao de 600°C, vem ao encontro da afirmação de HUMPHREYS¹⁴, o qual cita que a quantidade de gases remanescentes no carvão é sensivelmente reduzida a partir de 750°C. Portanto, a razão dessas pequenas variações dos teores de carbono fixo e materias voláteis no carvão produzido sob 800°C, em relação ao de 600°C, se deve ao fato de que grande parte dos gases volatilizáveis já terem sido liberados até a temperatura de 600°C.

Quadro: 19. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO VEGETAL À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA NO PATAMAR FINAL DE CARBONIZAÇÃO.

Temperatura final de carbonização - °C	Composição química do carvão vegetal					
	Carbono fixo		Materiais voláteis		Cinzas	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em minutos					
	10	30	10	30	10	30
Madeira: Angelim pedra						
400	70,67	71,66	28,23	27,21	1,10	1,13
600	84,79	85,62	14,01	13,14	1,20	1,24
800	91,31	92,5	7,39	6,53	1,30	1,30
Madeira: Maçaranduba						
400	68,74	71,22	29,58	27,01	1,68	1,71
600	84,04	85,8	14,21	12,43	1,75	1,76
800	90,26	91,2	7,98	6,49	1,76	1,76
Madeira: Cupiuba						
400	68,17	70,3	30,28	28,09	1,57	1,60
600	85,11	86,0	13,24	12,27	1,65	1,68
800	91,81	92,1	6,49	6,16	1,70	1,70

Figura: 20. TEOR DE CARBONO FIXO (base seca), À DI-
FERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMA-
NÊNCIA, EM (%).

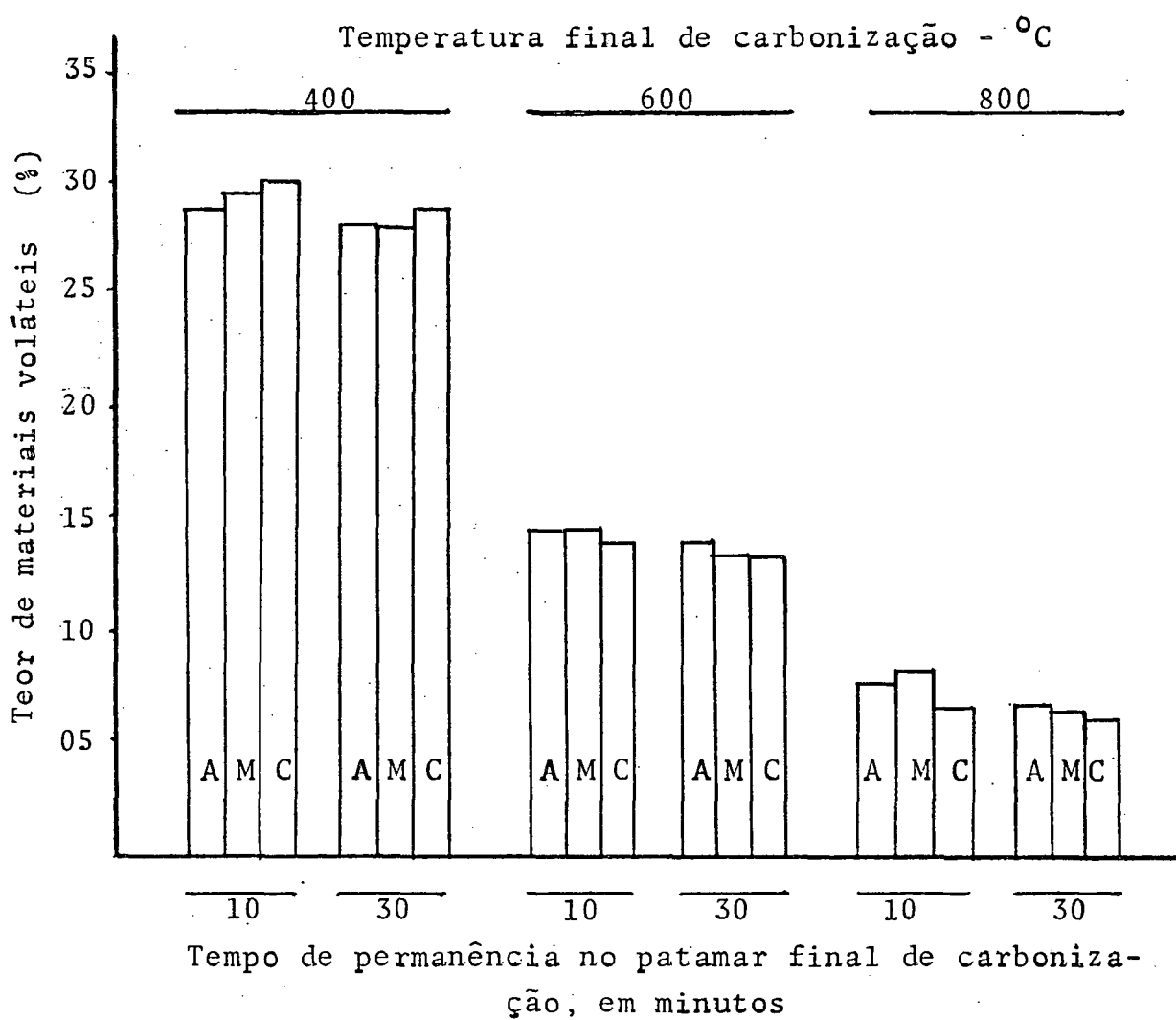


A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

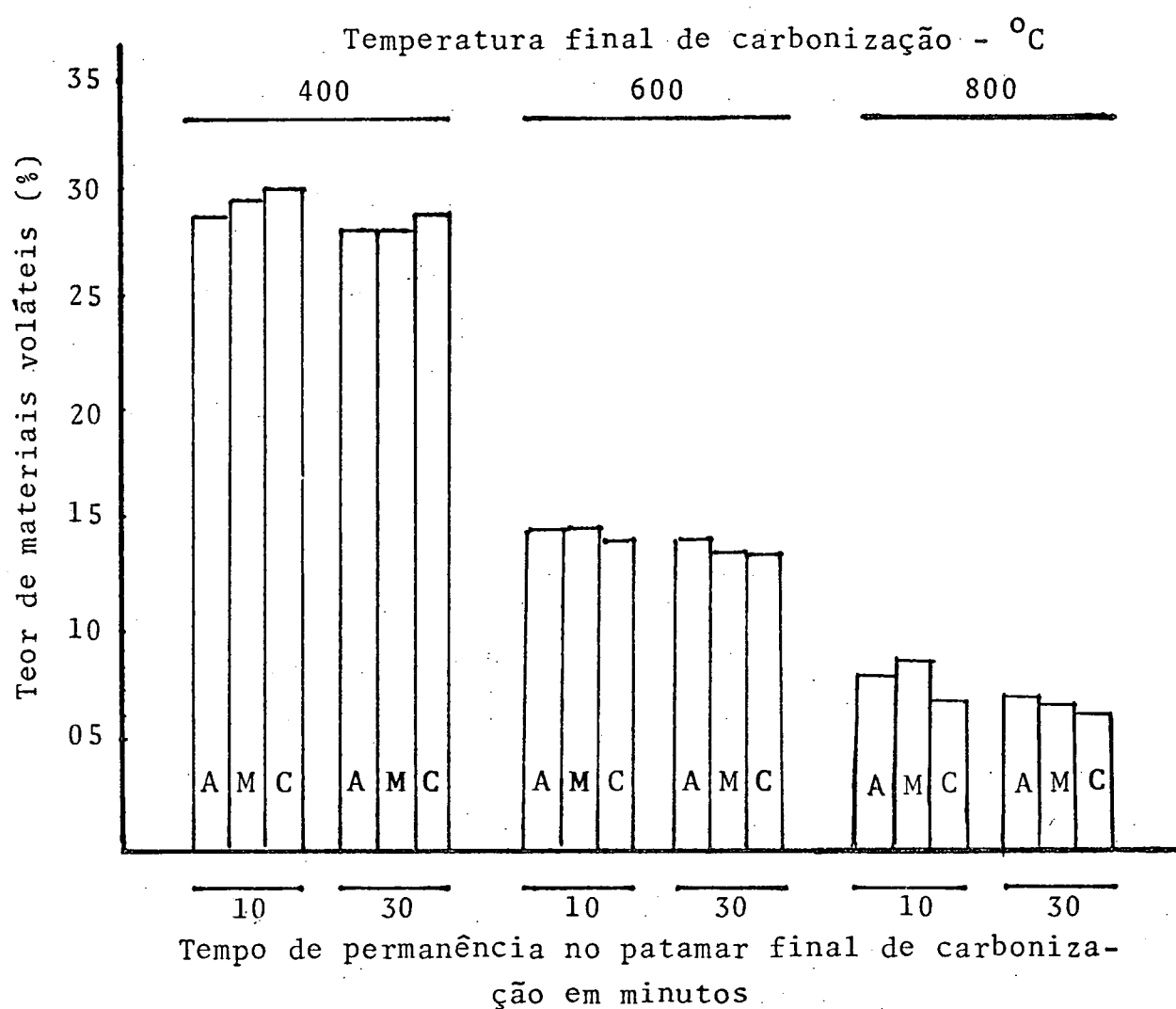
C - Cupiuba

Figura: 21. TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS (base seca) À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM PORCENTAGEM.



A - Angelim pedra
M - Maçaranduba
C - Cupiuba

Figura: 21. TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS (base seca), A DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM (%).



A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

É importante evidenciar que as variações mostradas representam as médias obtidas envolvendo apenas o efeito da temperatura, sem considerar as espécies e o efeito do tempo de permanência no patamar final de carbonização.

Com relação a tempo de permanência no patamar final de carbonização, observa-se que esse fator faz variar muito pouco os teores de carbono fixo e materiais voláteis. A razão da pequena variação percentual desses compostos químicos no carvão, possivelmente tenha sido causada pela pequena diferença do tempo de permanência, fato este que pode ter acarretado pouca eliminação de gases volatilizáveis. Essa argumentação está em parte concordante com LAMAXANA¹⁹, o qual diz que a quantidade de materiais voláteis é função do tempo de exposição da madeira ao calor.

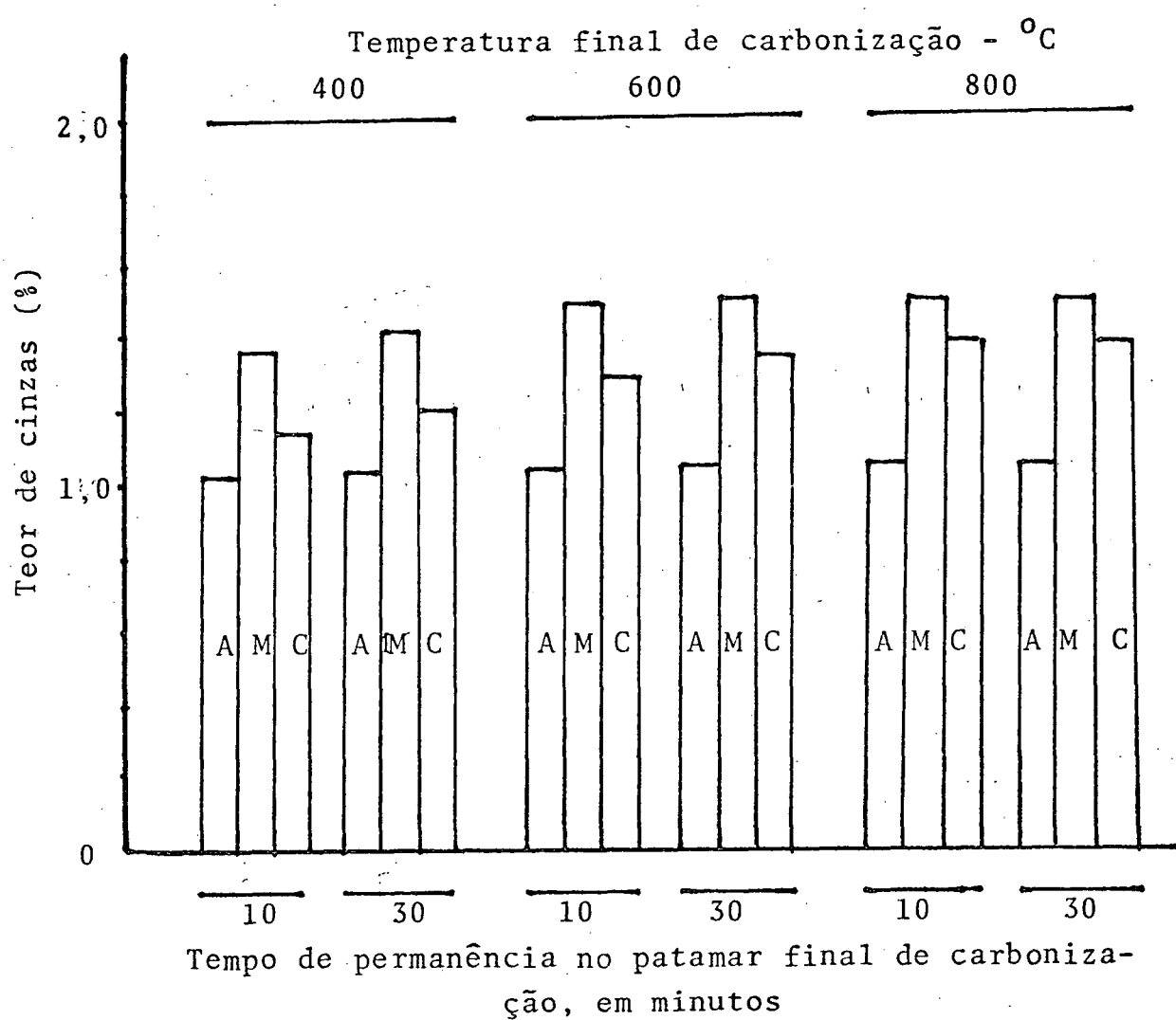
No tocante a teor de cinzas, os resultados mostram que a elevação da temperatura final de carbonização não causa variação significativa sobre o mesmo. É interessante, no entanto, observar a ligeira tendência de acréscimo de sua porcentagem quando se eleva a temperatura de carbonização. Tendência semelhante foi verificada por MENDES et alii quando carbonizaram madeira de *Eucalyptus grandis*, W.Hill.. A razão desse pequeno aumento do teor de cinzas pode ser explicada considerando que se "a quantidade de cinzas contidas no carvão depende diretamente da quantidade de materiais inorgânicos originalmente existentes na madeira"^{7,9}, e o teor de cinzas é obtido pela razão entre o peso de cinzas e o peso do carvão incenerado, então, a tendência citada tem lógica, uma vez que o rendimento em peso do carvão tende a decrescer com a elevação da temperatura de carbonização. Com relação a tempo de permanência no patamar final de carbonização, observou-se que praticamente este fator não causou efeito sobre o teor de cinzas.

Em geral, como pode ser observado nas figuras 20, 21 e 22, as porcentagens de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas não diferem muito entre as espécies estudadas, quando submetidas às mesmas condições de carbonização.

Os resultados das análises estatísticas são mostrados a seguir.

O teste de BARTTLET (ANEXO 10, quadro 6) indica que existe homogeneidade de variâncias dos tratamentos aplicados para

Figura: 22. TEOR DE CINZAS (base seca), À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM (%).



A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

os três casos (carbono fixo, materiais voláteis e cinzas).

A análise de variância do teor de carbono fixo (ANEXO 11 - quadro 7) revela que os tratamentos; os fatores Espécie (A), Tempo (B) e Temperatura (C); as interações A x B e A x C, apresentam diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade. As interações B x C e A x B x C, não apresentam diferenças significativas ao nível da probabilidade citada.

O teste de significância realizado através do método de SNK a 1% de probabilidade é mostrado no quadro 20. Observa-se que a temperatura final de carbonização exerceu significante influência sobre as espécies estudadas. O fator tempo de permanência no patamar final de carbonização causou efeito significativo apenas às madeiras de Maçaranduba e Cupiuba, quando carbonizadas sob 400°C.

A análise de variância do teor de materiais voláteis (ANEXO 12 - quadro 8) indica que os tratamentos; os fatores Tempo (B) e Temperatura (C) e a interação A x C, estatisticamente apresentam diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade. O fator Espécie (A) e as interações A x B, B x C e A x B x C, não apresentam diferenças significativas ao nível da probabilidade citada.

O teste de significância realizado através do método de SNK ao nível de 1% de probabilidade é mostrado no quadro 21. Observa-se que a temperatura de carbonização causou efeito significativo sobre as espécies estudadas. O fator tempo de permanência causou efeito significativo apenas às madeiras de Maçaranduba e Cupiuba, quando carbonizadas sob 400°C.

A análise de variância do teor de cinzas (ANEXO 13 - quadro 9) revela que os tratamentos; os fatores Espécie (A), Tempo (B) e Temperatura (C); e a interação A x C, estatisticamente apresentam diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade. Para as interações A x B e A x B x C, a análise indica que elas não apresentam diferenças significativas ao nível da probabilidade citada.

O teste de significância realizado através do método de SNK ao nível de 1% de probabilidade é mostrado no quadro 22. Observa-se que a temperatura final de carbonização não causou e

QUADRO: 20 . TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO TEOR DE CARBONO FIXO PELO MÉTODO SNK A 1% DE PROBABILIDADE.

Tratamen- tos	\bar{x} (%)	T14	T18	T17	T15	T13	T16	T12	T10	T8	T11	T7	T9	T2	T4	T1	T6	T3	T15
		800/30 A	800/30 C	800/10 C	800/10 M	800/10 A	800/30 M	600/30 C	600/10 M	600/30 A	600/10 C	600/10 A	600/10 M	400/30 A	400/30 M	400/10 A	400/30 C	400/10 M	400/10 C
		92,17	92,14	91,81	91,75	91,31	90,26	86,05	85,81	85,62	85,11	84,79	84,04	71,66	71,28	70,67	70,31	68,74	68,17
T5	68,17	24,00**	23,97**	23,64**	23,58**	23,14**	22,09**	17,88**	17,64**	17,45**	16,94**	16,62**	15,87**	3,49**	3,11**	2,50**	2,14**	0,57 ^{ns}	-
T3	68,74	23,43**	23,40**	23,07**	23,01**	22,57**	21,52**	17,31**	17,07**	16,88**	16,37**	16,05**	15,30**	2,92**	2,54**	1,93**	1,57 ^{ns}	-	
T6	70,31	21,86**	21,83**	21,50**	21,44**	21,00**	19,95**	15,74**	15,50**	15,31**	14,80**	14,48**	13,73**	1,35 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,36 ^{ns}	-		
T1	70,67	21,50**	21,43**	21,14**	21,08**	20,64**	19,59**	15,38**	15,14**	14,95**	14,44**	14,12**	13,37**	0,99 ^{ns}	0,61 ^{ns}	-			
T4	71,28	20,89**	20,86**	20,53**	20,47**	20,03**	18,98**	14,77**	14,53**	14,34**	13,83**	13,51**	12,76**	0,38 ^{ns}	-				
T2	71,66	20,51**	20,48**	20,15**	20,09**	19,65**	18,60**	14,39**	14,15**	13,96**	13,45**	13,13**	12,38**	-					
T9	84,04	8,13**	8,10**	7,77**	7,71**	7,27**	6,22**	2,01 ^{ns}	1,77 ^{ns}	1,5 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,75 ^{ns}	-						
T7	84,79	7,38**	7,35**	7,08**	6,96**	6,52**	5,47**	1,26 ^{ns}	1,02 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,38 ^{ns}	-							
T11	85,11	7,06**	7,03**	6,70**	6,64**	6,20**	5,15**	0,94 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,51 ^{ns}	-								
T8	85,62	6,55**	6,52**	6,19**	6,13**	5,69**	4,64**	0,43 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-									
T10	85,81	6,36**	6,33**	6,00**	5,94**	5,50**	4,45**	0,24 ^{ns}	-										
T12	86,05	6,12**	6,09**	5,76**	5,70**	5,26**	4,21**	-											
T16	90,26	1,91 ^{ns}	1,88 ^{ns}	1,55 ^{ns}	1,49 ^{ns}	1,05 ^{ns}	-												
T13	91,31	0,86 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,44 ^{ns}	-													
T15	91,75	0,42 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-														
T17	91,81	0,36 ^{ns}	0,33 ^{ns}	-															
T18	92,14	0,03 ^{ns}	-																
T14	92,17	-																	

400, 600 e 800 - Temperaturas finais de carbonização, em °C

10 e 30 - Tempos de permanência no patamar final de carbonização, em minutos

A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

COMPARADOR SNK AO NÍVEL DE 1% DE PROBABILIDADE

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
COMP.	1,68	1,91	2,05	2,15	2,22	2,29	2,33	2,38	2,43	2,46	2,49	2,52	2,55	2,57	2,60	2,62	2,64

QUADRO: 21. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS, PELO MÉTODO SNK A 1% DE PROBABILIDADE.

Tratamen- tos	$\bar{x}(\%)$	T5	T3	T1	T6	T2	T4	T9	T7	T11	T8	T10	T12	T15	T13	T14	T16	T17	T18
		400/10 C	400/10 M	400/10 A	400/30 C	400/30 A	400/30 M	600/10 M	600/10 A	600/10 C	600/30 A	600/30 M	600/30 A	800/10 M	800/10 A	800/10 A	800/30 M	800/30 C	800/30 C
	$\bar{x}(\%)$	30,28	29,58	29,23	28,09	27,21	27,01	14,21	14,07	13,24	13,14	12,43	12,27	7,98	7,39	6,52	6,49	6,49	6,16
T18	6,16	24,12**	23,42**	22,07**	21,93**	21,05**	20,85**	8,05**	7,91**	7,08**	6,98**	6,27**	6,11**	1,82 ^{ns}	1,23 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-
T17	6,49	23,79**	23,09**	21,74**	21,60**	20,72**	20,52**	7,72**	7,58**	6,75**	6,65**	5,94**	5,78**	1,49 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-	
T4	6,49	23,79**	23,09**	21,74**	21,60**	20,72**	20,52**	7,72**	7,58**	6,75**	6,65**	5,94**	5,78**	1,49 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-		
T15	6,52	23,76**	23,06**	21,71**	21,57**	20,69**	20,49**	7,69**	7,55**	6,72**	6,62**	5,91**	5,75**	1,46 ^{ns}	0,87 ^{ns}	-			
T13	7,39	22,89**	22,19**	20,84**	20,70**	19,82**	19,62**	6,82**	6,68**	5,85**	5,75**	5,04**	4,48**	0,59 ^{ns}	-				
T12	7,98	21,89**	21,60**	20,25**	20,11**	19,23**	19,03**	6,23**	6,09**	5,26**	5,16**	4,45**	4,29**	-					
T10	12,27	18,01**	17,31**	15,96**	15,82**	14,94**	14,74**	1,94 ^{ns}	1,80 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,16 ⁿ⁻	-						
T8	12,43	17,85**	17,15**	15,80**	15,66**	14,78**	14,58**	1,78 ^{ns}	1,64 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-							
T11	13,24	17,14**	16,44**	15,09**	14,95**	14,07**	13,87**	1,07 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-								
T7	14,07	17,04**	16,34**	14,99**	14,85**	13,07**	13,77**	0,97 ^{ns}	0,83 ^{ns}	-									
T9	14,21	16,21**	15,51**	14,14**	14,02**	13,14**	12,94**	0,14 ^{ns}	-										
T4	17,01	16,07**	15,37**	14,02**	13,88**	13,00**	12,80**	-											
T2	27,21	3,27**	2,57**	1,22 ^{ns}	1,08 ^{ns}	0,20 ^{ns}	-												
T6	28,09	3,07**	2,37**	1,02 ^{ns}	0,88 ^{ns}	-													
T1	29,23	2,19**	1,49 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-														
T3	29,58	1,05 ^{ns}	0,35 ^{ns}	-															
T5	30,28	0,70 ^{ns}	-																

400, 600 e 800 - Temperaturas finais de carbonização, em °C
10 e 30 - Tempos de permanência no patamar final de carbonização, em minutos

A - Angelim pedra
M - Maçaranduba
C - Cupiuba

COMPARADOR SNK AO NÍVEL DE 1% DE PROBABILIDADE

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Comp.	1,68	1,91	2,05	2,15	2,22	2,29	2,34	2,38	2,43	2,46	2,49	2,52	2,55	2,57	2,60	2,62	2,64

QUADRO: 22. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO TEOR DE CINZAS, PELO MÉTODO SNK A 1% DE PROBABILIDADE.

Tratamen- tos		T15	T16	T10	T9	T4	T17	T18	T3	T12	T11	T6	T5	T13	T14	T8	T7	T2	T1
		$\frac{800/10}{M}$	$\frac{800/30}{M}$	$\frac{600/30}{M}$	$\frac{600/10}{M}$	$\frac{400/30}{M}$	$\frac{800/10}{M}$	$\frac{800/30}{C}$	$\frac{400/10}{C}$	$\frac{600/10}{M}$	$\frac{600/10}{C}$	$\frac{400/30}{C}$	$\frac{400/10}{C}$	$\frac{800/10}{C}$	$\frac{800/30}{A}$	$\frac{600/30}{A}$	$\frac{600/10}{A}$	$\frac{400/30}{A}$	$\frac{400/10}{A}$
	$\bar{x} (\%)$	1,76	1,76	1,76	1,75	1,71	1,70	1,70	1,68	1,68	1,65	1,60	1,57	1,30	1,30	1,24	1,20	1,13	1,10
T1	1,10	0,66**	0,66**	0,66**	0,65**	0,61**	0,60**	0,60**	0,58**	0,58**	0,55**	0,50**	0,47**	0,20**	0,20**	0,14**	0,10**	0,03**	-
T2	1,13	0,63**	0,63**	0,63**	0,62**	0,58**	0,57**	0,57**	0,55**	0,55**	0,52**	0,47**	0,44**	0,17**	0,17**	0,11**	0,07**	-	
T7	1,20	0,56**	0,56**	0,56**	0,55**	0,51**	0,50**	0,50**	0,48**	0,48**	0,45**	0,40**	0,37**	0,10**	0,10**	0,04**	-		
T8	1,24	0,52**	0,52**	0,52**	0,51**	0,47**	0,46**	0,46**	0,44**	0,44**	0,41**	0,36**	0,33**	0,06**	0,06**	-			
T14	1,30	0,46**	0,46**	0,46**	0,45**	0,41**	0,40**	0,40**	0,38**	0,38**	0,35**	0,30**	0,27**	0,00 ^{ns}	-				
T13	1,30	0,46**	0,46**	0,46**	0,45**	0,41**	0,40**	0,40**	0,38**	0,38**	0,35**	0,30**	0,27**	-					
T5	1,57	0,19**	0,19**	0,19**	0,18**	0,14**	0,13**	0,13**	0,11**	0,11**	0,08**	0,03**	-						
T6	1,60	0,16**	0,16**	0,16**	0,15**	0,11**	0,10**	0,10**	0,08**	0,08**	0,05**	-							
T11	1,65	0,11**	0,11**	0,11**	0,10**	0,06**	0,05**	0,05**	0,03**	0,03**	-								
T12	1,68	0,08**	0,08**	0,08**	0,07**	0,03**	0,02**	0,02**	0,00 ^{ns}	-									
T13	1,68	0,08**	0,08**	0,08**	0,07**	0,03**	0,02**	0,02**	-										
T18	1,70	0,06**	0,06**	0,06**	0,05**	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-											
T17	1,70	0,06**	0,06**	0,06**	0,05**	0,01 ^{ns}	-												
T4	1,71	0,05**	0,05**	0,05**	0,00 ^{ns}	-													
T9	1,75	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-														
T10	1,76	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-															
T16	1,76	0,00 ^{ns}	-																
T15	1,76	-																	

400, 600 e 800 - Temperaturas finais de carbonização, em °C
10 e 30 - Tempos de permanência no patamar final de carbonização, em minutos

A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

COMPARADOR SNK AO NÍVEL DE 1% DE PROBABILIDADE

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Comp.	0,022	0,025	0,027	0,028	0,29	0,30	0,031	0,031	0,032	0,032	0,033	0,033	0,033	0,034	0,034	0,034	0,035

feito significativo para madeira de Maçaranduba carbonizada sob 600°C em relação a de 800°C e para madeira de Cupiuba carbonizada sob $600^{\circ}\text{C}/30$ minutos em relação a de 800°C . Com relação ao fator tempo de permanência no patamar final de carbonização, observa-se que as madeiras carbonizadas sob 800°C não sofreram um efeito significativo. As madeiras carbonizadas sob 400°C e 600°C foram significativamente influenciadas por este fator, exceto, a madeira de Maçaranduba .

4.6. PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO.

No quadro 23, encontram-se as médias de poder calorífico superior do carvão determinado em uma bomba calorimétrica. Observa-se que os carvões produzidos sob temperatura de 600°C , independentemente da espécie e do tempo de permanência no patamar final de carbonização, apresentaram médias de poder calorífico maiores do que as dos carvões produzidos sob 400°C e 800°C , vin assim confirmar os resultados de outros pesquisadores como MENDES et alii²³ e SATONAKA²⁸. A figura 23, permite ter uma melhor visualização dessa variação de poder calorífico em função da temperatura de carbonização.

Por outro lado, esses dados divergem das informações de BAILEYS & BLANKENHORN², os quais citam que o calor de combustão do carvão aumenta proporcionalmente com o acréscimo constante da temperatura. A carbonização contínua aumenta o conteúdo de carbono fixo, conseqüentemente aumentando o poder calorífico do carvão.

É importante, no entanto, ressaltar que o poder calorífico do carvão não pode ser considerado, tomando-se como base apenas a combustão do carbono fixo, visto que, os materiais voláteis também apresentam um determinado grau de calorias.

A análise química tem mostrado que o carvão é fundamentalmente constituído por três elementos que são: C (carbono), H (hidrogênio) e O (oxigênio).³⁶

Segundo EARL⁹, 1 (um) grama de carbono produz cerca de 7900 calorias, e para a mesma quantidade o hidrogênio produz 34000 calorias.

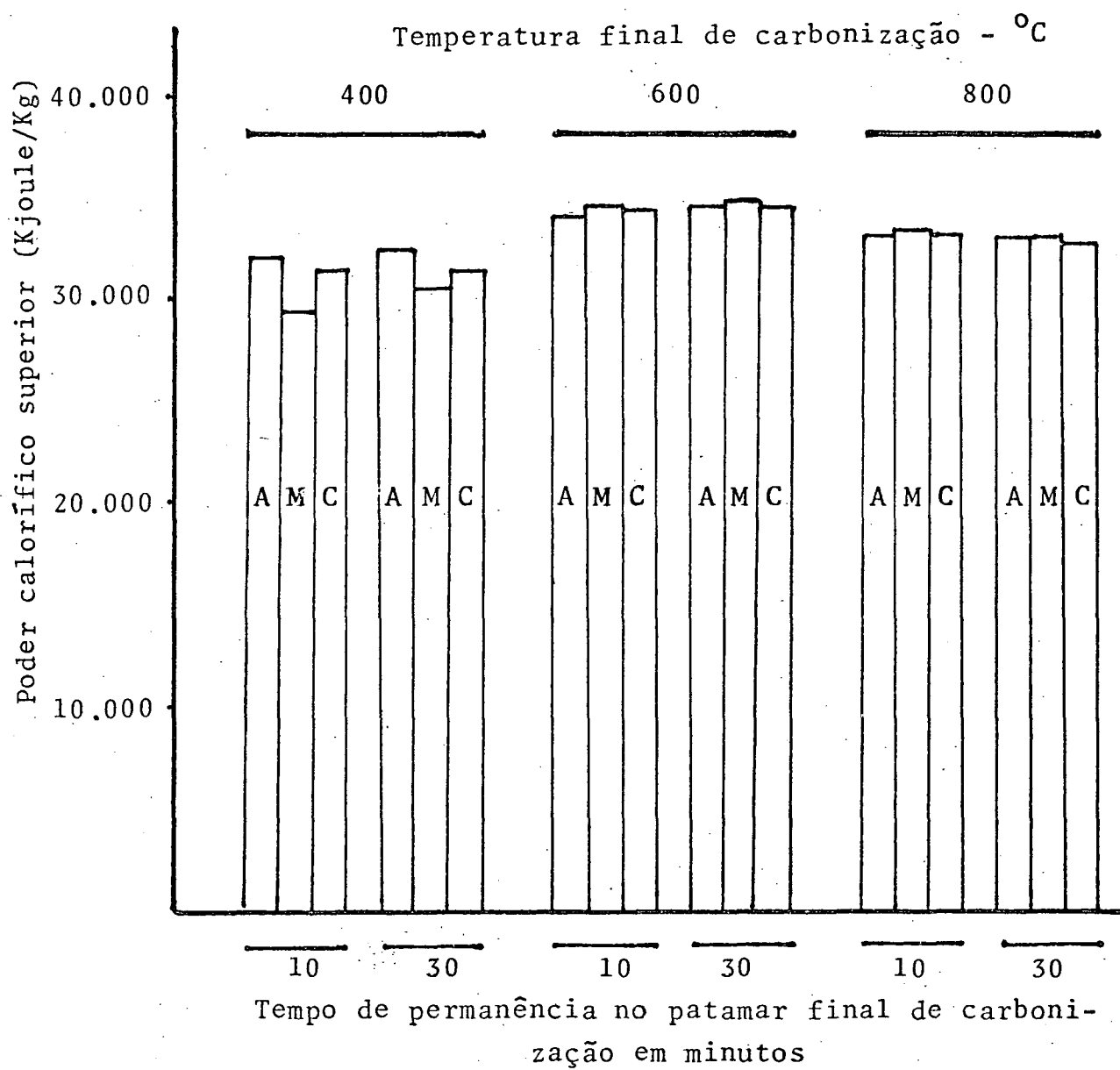
Portanto, a variação a quantidade desses elementos químicos no carvão, faz, presumidamente, variar o seu poder calorífico.

Com relação aos resultados obtidos, observa-se que houve um aumento médio de 3.388 Kjoule/Kg no poder calorífico quando a temperatura de carbonização passou de 400°C para 600°C , sendo destaque o carvão produzido com madeira de Maçaranduba que teve um aumento de 4.486 Kjoule/Kg. A passagem da temperatura de 600°C para 800°C proporcionou um decréscimo médio de 1.467 Kjoule/Kg. Esse decréscimo, observado com o carvão produzido

Quadro: 23. PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO, À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM Kjoule/Kg.

Temperatura final de carbonização - °C	M A D E I R A					
	Angelim pedra		Maçaranduba		Cupiuba	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em minutos					
	10	30	10	30	10	30
400	32.410	32.693	29.819	30.973	31.972	31.935
600	34.524	34.891	34.668	35.095	34.778	34.735
800	33.427	33.430	33.503	33.205	33.300	33.028

Figura: 23. PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO, À DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM Kjoule/Kg.



A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

sob 800°C , vem concordar com a argumentação de SATONAKA²⁸, quando cita que o carvão produzido sob temperaturas superiores a 600°C sofre uma redução em seu grau calorífico, possivelmente devido ao maior efeito da diminuição da porcentagem de hidrogênio do que ao efeito do aumento de carbono fixo.

É interessante também observar o resultado do trabalho de PETROFF & DOAT²⁵. Esses pesquisadores ao fazerem um estudo sobre a correlação entre o poder calorífico superior e o teor de materiais voláteis, concluíram que o poder calorífico do carvão atinge o seu pico quando a porcentagem de materiais voláteis contidos no respectivo carvão é cerca de 13%. Os resultados encontrados no presente trabalho vem confirmar os resultados dos autores anteriormente citados. O carvão produzido sob temperatura de 600°C , apresentou em média 13,21% de materiais voláteis, faixa na qual também obteve-se a maximização do poder calorífico superior do carvão.

Isto permite argumentar que os materiais voláteis remanescentes no carvão produzido sob 600°C , possuem alto calor de combustão. Essa argumentação também é defendida de certa forma por OLIVEIRA et alii²⁴, quando citam que o carvão produzido sob 500°C atinge o seu valor máximo de seu poder calorífico, devido possivelmente a quantidade relativamente alta de carbono fixo e de materiais voláteis com alto calor de combustão.

Todas essas argumentações podem ser fundamentadas, se observarmos o quadro 11 (página 19) onde são mostrados que os carvões produzidos sob temperaturas de 500°C e 600°C possuem os maiores valores de poder calorífico superior, vindo assim confirmar os resultados obtidos neste trabalho e os resultados de SATONAKA²⁸ e OLIVEIRA et alii²⁴.

Portanto, conclui-se que o poder calorífico superior do carvão é função direta de sua composição química.

Com relação a tempo de permanência no patamar final de carbonização, observou-se que a passagem de dez para trinta minutos proporcionou uma pequena variação no poder calorífico superior do carvão. Não foi encontrado em literaturas destaque a respeito do efeito do tempo de carbonização sobre o poder calorífico do carvão. No entanto, considerando-se que esta propriedade basicamente depende dos teores de carbono fixo e materiais

voláteis, que também são pouco influenciados pelo fator tempo de permanência, a pequena variação do poder calorífico do carvão é uma resultante lógica.

Os resultados das análises estatísticas são mostrados a seguir.

O teste de BARTTLET (ANEXO 14, quadro 10) indica que existe homogeneidade de variâncias dos tratamentos aplicados.

A análise de variância (ANEXO 15, quadro 11) revela que os tratamentos; os fatores espécie (fator A), tempo (fator B) e temperatura (fator C); e as respectivas interações (AxB, AxC, BxC e AxBxC) apresentam diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade.

O teste de significância realizado pelo método de SNK a 1% de probabilidade é mostrado no quadro 24. O teste revela que a temperatura final de carbonização exerce significância influência sobre o poder calorífico superior do carvão. Com relação ao tempo de permanência, observa-se que este fator causa influência apenas à madeira de Maçaranduba, quando carbonizada sob 400°C.

QUADRO: 24. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO CARVÃO, PELO MÉTODO SNK A 1% DE PROBABILIDADE.

Tratamen- tos		T10	T8	T11	T12	T9	T7	T15	T14	T13	T17	T16	T18	T2	T1	T5	T6	T4	T3
		$\frac{600/30}{M}$	$\frac{600/30}{A}$	$\frac{600/10}{C}$	$\frac{600/30}{C}$	$\frac{600/10}{M}$	$\frac{600/10}{A}$	$\frac{800/10}{M}$	$\frac{800/30}{A}$	$\frac{800/10}{A}$	$\frac{800/10}{C}$	$\frac{800/30}{M}$	$\frac{800/30}{C}$	$\frac{400/30}{A}$	$\frac{400/10}{A}$	$\frac{400/10}{C}$	$\frac{400/30}{C}$	$\frac{400/30}{M}$	$\frac{400/10}{M}$
	\bar{X}	35.096	34.891	34.778	34.735	34.668	34.524	33.503	33.430	33.427	33.300	33.205	33.028	32.693	32.410	31.972	31.935	30.973	29.819
T3	29.819	5.277**	5.072**	4.959**	4.916**	4.849**	4.705**	3.684**	3.611**	3.608**	3.481**	3.386**	3.209**	2.874**	2.591**	2.153**	2.116**	1.153**	-
T4	30.973	4.123**	3.918**	3.805**	3.762**	3.695**	3.551**	2.530**	2.457**	2.454**	2.327**	2.232**	2.055**	1.720**	1.437**	999**	962**	-	
T6	31.935	3.161**	2.956**	2.843**	2.800**	2.733**	2.589**	1.568**	1.495**	1.492**	1.365**	1.270**	1,093**	758**	475 ^{ns}	37 ^{ns}	-		
T5	31.972	3.124**	2.919**	2.806**	2.763**	2.696**	2.552**	1.531**	1.458**	1.455**	1.328**	1.233**	1.056**	721**	438 ^{ns}	-			
T1	32.410	2.686**	2.481**	2.368**	2.325**	2.258**	2.114**	1.093**	1.020**	1.017**	890**	795**	382 ^{ns}	283 ^{ns}	-				
T2	32.697	2.403**	2.198**	2.085**	2.042**	1.975**	1.831**	810**	737**	734**	607**	512 ^{ns}	334 ^{ns}	-					
T18	33.028	2.068**	1.863**	1.750**	1.640**	1.496**	1.475**	475 ^{ns}	402 ^{ns}	399 ^{ns}	272 ^{ns}	177 ^{ns}	-						
T16	33.205	1.891**	1.686**	1.573**	1.530**	1.463**	1.319**	298 ^{ns}	225 ^{ns}	222 ^{ns}	95 ^{ns}	-							
T17	33.300	1.796**	1.591**	1.478**	1.435**	1.368**	1.224**	203 ^{ns}	130 ^{ns}	127 ^{ns}	-								
T13	33.427	1.669**	1.464**	1.351**	1.308**	1.241**	1.097**	76 ^{ns}	3 ^{ns}	-									
T14	33.430	1.666**	1.461**	1.348**	1.305**	1.238**	1.094**	73 ^{ns}	-										
T15	33.503	1.593**	1.388**	1.275**	1.232**	1.165**	1.021**	-											
T7	34.524	572 ^{ns}	367 ^{ns}	254 ^{ns}	211 ^{ns}	144 ^{ns}	-												
T9	34.668	428 ^{ns}	223 ^{ns}	110 ^{ns}	67 ^{ns}	-													
T12	34.735	361 ^{ns}	156 ^{ns}	43 ^{ns}	-														
T11	34.778	318 ^{ns}	113 ^{ns}	-															
T8	34.891	205 ^{ns}	-																
T10	35.096	-																	

400, 600 e 800 - Temperaturas finais de carbonização, em °C

10 e 30 - Tempos de permanência no patamar final de carbonização, em minutos

A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

\bar{X} - média em Kjoule/Kg de carvão

400, 600 e 800 - Temperaturas finais de carbonização, em °C

10 e 30 - Tempos de permanência no patamar final de carbonização, em minutos

A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

\bar{X} - média em Kjoule/Kg de carvão

COMPARADOR SNK AO NÍVEL DE 1% DE PROBABILIDADE

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Comp.	512,3	583,5	626,0	656,1	678,0	697,2	713,6	727,3	739,6	750,6	760,2	769,8	778,0	784,9	791,7	798,0	804,0

4.7. POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA CONVERTÍVEL EM CARVÃO.

As estimativas médias da potencialidade energética da madeira convertível em carvão, com base no rendimento gravimétrico e poder calorífico superior do carvão, são mostradas no quadro 25. Nota-se que a potencialidade energética diminui, principalmente com a elevação da temperatura final de carbonização. A figura 24 permite fazer essa observação.

Analisando as tendências do rendimento gravimétrico e do poder calorífico superior do carvão, em função da temperatura e do tempo de permanência no patamar final de carbonização, observadas nas figuras 18 e 23, respectivamente, verifica-se que a potencialidade apresentou uma tendência típica a do rendimento gravimétrico do carvão. Isto permite argumentar que o efeito da queda do rendimento face o aumento da temperatura e do tempo de permanência no patamar final de carbonização, é mais acentuado do que o efeito da variação do poder calorífico, que registrou um maior valor com o carvão produzido sob temperatura de 600°C.

Nota-se que a elevação da temperatura de carbonização de 400°C para 600°C, fez decrescer a potencialidade em média 2.076 Kjoule/Kg, correspondendo cerca de 16%, e a passagem de 600°C para 800°C decresceu em média 1.514 Kjoule/Kg, cerca de 13,8%. As madeiras carbonizadas sob 800°C apresentaram uma queda de 3.590 Kjoule/Kg, em relação às madeiras carbonizadas sob 400°C, representando cerca de 28% de redução.

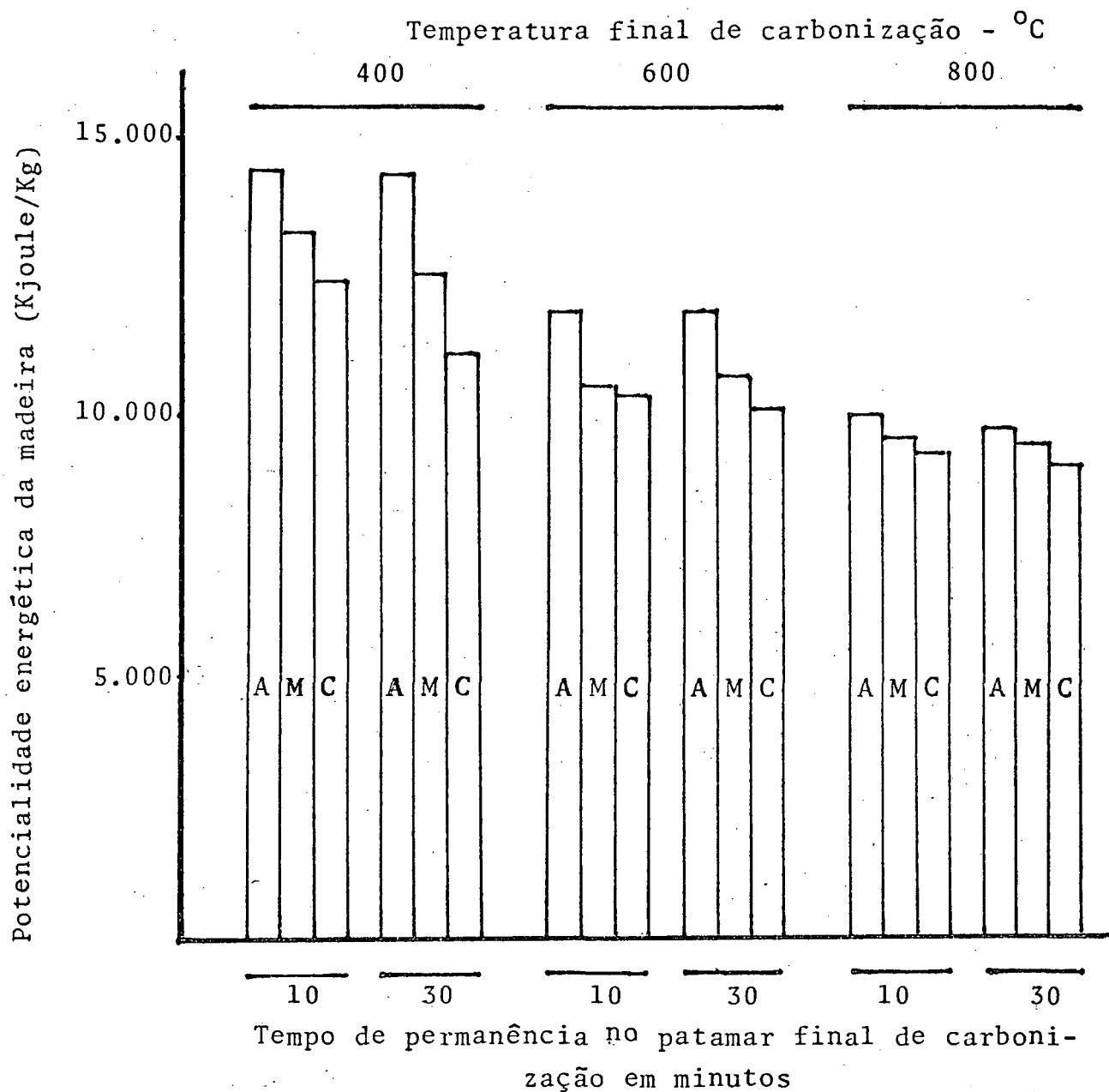
No tocante ao tempo de permanência no patamar final de carbonização, observa-se que o seu efeito sobre a potencialidade energética é muito pequeno, quando comparado com o efeito da temperatura de carbonização. O aumento do tempo de permanência de 10 (dez) para 30 (trinta) minutos também tende a decrescer a potencialidade, acompanhando a mesma tendência observada com o rendimento gravimétrico do carvão. As menores reduções foram obtidas com madeiras de Maçaranduba e Cupiuba, cujos valores médios foram de 874 Kjoule/Kg e 1.235 Kjoule/Kg, respectivamente, quando carbonizadas sob 400°C. As demais reduções não ultrapassaram a 310 Kjoule/Kg.

Isto permite concluir que a potencialidade energética da madeira depende fundamentalmente do rendimento gravimétrico do

Quadro: 25. POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA CONVERTÍVEL EM CARVÃO
 A DIFERENTES TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA, EM
 Kjoule/Kg DE MADEIRA.

Temperatura final de carbonização - °C	M A D E I R A					
	Angelim pedra		Maçaranduba		Cupiuba	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em minutos					
	10	30	10	30	10	30
400	14.474	14.387	13.277	12.404	12.311	11.076
600	11.974	11.961	10.563	10.618	10.316	10.042
800	9.904	9.600	9.540	9.294	9.172	8.878

Figura: 24. POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA
CONVERTIDA EM CARVÃO, ÀS DIFERENTES
TEMPERATURAS E TEMPOS DE PERMANÊNCIA
EM Kjoule/Kg, DE MADEIRA.



A - Angelim pedra
M - Maçaranduba
C - Cupiuba

carvão que varia sensivelmente com a temperatura de carbonização. Portanto, ao se desejar obter elevada potencialidade não convém carbonizar a madeira sob alta temperatura.

Para as condições em que foi desenvolvido o trabalho, o limite de 400°C e 600°C é conveniente se se objetivar obter alta potencialidade. Sob 400°C a carbonização se completa, segundo UHART³⁴, e sob 600°C obtém-se um rendimento satisfatório em carvão, equivalendo-se ao de eucaliptos produzido sob as mesmas condições. Com relação a madeira carbonizada sob 800°C, apesar de apresentar menor potencialidade, possui uma qualidade importante que é o alto teor de carbono fixo.

Sob o aspecto geral, observa-se que as madeiras de Angelim pedra e Maçaranduba potencialmente são melhores em termos energéticos do que a madeira de Cupiuba.

Os resultados das análises estatísticas são mostrados a seguir.

O teste de BARTLETT (ANEXO 16, quadro 12) indica que existe homogeneidade de variâncias dos tratamentos aplicados.

A análise de variância (ANEXO 17, quadro 13) revela que os tratamentos; os fatores espécie (fator A), tempo (fator B) e temperatura (fator C); as interações Ax B, Ax C, Bx C e Ax Bx C, apresentam diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade.

O teste de significância realizado pelo método de SNK a 1% de probabilidade é mostrado no quadro 26. Com base neste teste, pode-se fazer uma análise do efeito dos fatores temperatura e tempo de permanência no patamar final de carbonização, sobre as espécies estudadas. Observa-se que o fator temperatura causa efeito significativo sobre a potencialidade. Com relação ao fator tempo de permanência, verifica-se que o seu efeito só é significativo sobre a potencialidade das madeiras de Maçaranduba e Cupiuba carbonizadas sob 400°C.

QUADRO: 26. TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DA POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA, PELO MÉTODO SNK A 1% DE PROBABILIDADE.

Tratamen- tos	\bar{X}	T1	T2	T3	T4	T5	T7	T8	T6	T10	T9	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
		$\frac{400/10}{A}$	$\frac{400/30}{A}$	$\frac{400/10}{M}$	$\frac{400/30}{M}$	$\frac{400/10}{C}$	$\frac{600/10}{A}$	$\frac{600/30}{A}$	$\frac{400/30}{C}$	$\frac{600/30}{M}$	$\frac{600/10}{M}$	$\frac{400/10}{C}$	$\frac{400/30}{C}$	$\frac{800/10}{A}$	$\frac{800/30}{A}$	$\frac{800/10}{M}$	$\frac{800/30}{M}$	$\frac{800/10}{C}$	$\frac{800/30}{C}$
T18	8.878	5.596**	5.509**	4.399**	3.526**	3.433**	3.096**	3.083**	2.198**	1.740**	1.685**	1.438**	1.164**	1.026**	722**	662**	416**	294 ^{ns}	-
T17	9.172	5.302**	5.215**	4.105**	3.232**	3.139**	2.802**	2.789**	1.904**	1.446**	1.391**	1.144**	870**	732**	428 ^{ns}	368 ^{ns}	122 ^{ns}	-	-
T16	9.294	5.180**	5.093**	3.983**	3.110**	3.017**	2.680**	2.667**	1.782**	1.324**	1.269**	1.022**	748**	610**	306 ^{ns}	246 ^{ns}	-	-	-
T15	9.540	4.934**	4.847**	3.737**	2.864**	2.771**	2.434**	2.421**	1.536**	1.078**	1.023**	776**	502**	364 ^{ns}	60 ^{ns}	-	-	-	-
T14	9.600	4.874**	4.787**	3.677**	2.804**	2.711**	2.374**	2.301**	1.476**	1.018**	963**	716**	442**	304 ^{ns}	-	-	-	-	-
T13	9.904	4.570**	4.483**	3.373**	2.500**	2.407**	2.070**	2.057**	1.172**	714**	659**	412**	138 ^{ns}	-	-	-	-	-	-
T12	10.042	4.432**	4.345**	3.235**	2.362**	2.269**	1.932**	1.919**	1.034**	576**	521**	274 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-
T11	10.316	4.158**	4.071**	2.961**	2.088**	1.995**	1.658**	1.645**	760**	302 ^{ns}	247 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-
T9	10.563	3.911**	3.824**	2.714**	1.841**	1.748**	1.411**	1.398**	513**	55 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T10	10.618	3.856**	3.769**	2.659**	1.786**	1.693**	1.356**	1.343**	458**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	11.076	3.398**	3.311**	2.201**	1.328**	1.235**	898**	885**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	11.961	2.513**	2.426**	1.316**	443**	350 ^{ns}	13 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T7	11.974	2.500**	2.413**	1.303**	430**	337 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T5	12.311	2.163**	2.076**	966**	93 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T4	12.404	2.070**	1.983**	873**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3	13.277	1.197**	1.110**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	14.387	87 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T1	14.474	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

400, 600 e 800 - Temperaturas finais de carbonização, em °C
10 e 30 - Tempos de permanência no patamar final de carbonização, em minutos

A - Angelim pedra

M - Maçaranduba

C - Cupiuba

\bar{X} - média em Kjoule/kg de madeira

COMPARADOR SNK AO NÍVEL DE 1% DE PROBABILIDADE

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Comp.	351	400	429	450	465	478	489	499	507	515	521	528	534	538	543	548	551

No quadro 27, são mostradas as estimativas da potencialidade energética das madeiras estudadas, por área, com base no volume das árvores exploradas (ver ANEXO 2, quadro 1); na estimativa do rendimento em madeira serrada encontrada por SUDAM³²; na relação madeira serrada/resíduos na mata, segundo JAN-KAUSKIS¹⁵ e nos valores do quadro 25, referente a potencialidade energética por unidade de peso da madeira. Observa-se que a madeira de Maçaranduba destacou-se como a espécie de maior potencialidade por área, para qualquer condição de carbonização, seguida de Angelim pedra e Cupiuba. Essa característica de maior potencialidade da madeira de Maçaranduba se deve ao fato da maior quantidade de árvores exploradas na área, em consequência maior volume de resíduos deixados na floresta. Conclui-se, portanto, que a potencialidade energética da madeira por área, basicamente é influenciado pelo aspecto de maior volume de resíduos deixados na mata, que tem relação direta com a quantidade de árvores exploradas por unidade de área.

Para se ter uma melhor idéia da potencialidade energética da madeira, é interessante transformá-la em quantidade de carvão e a sua respectiva correspondência em tonelada equivalente petróleo - TEP.

No quadro 28, encontram-se os valores da potencialidade, convertidos em tonelada equivalente petróleo, com base na relação 1,59 TON. de carvão = 1 TEP.

Pode-se concluir quanto ao quadro apresentado, que o aproveitamento de resíduos da exploração florestal das espécies estudadas, na forma de carvão vegetal, representa uma considerável fonte de energia. A soma dos valores correspondentes em TEP de cada um dos patamares finais de carbonização, reflete em média 21,4 TEP quando as madeiras são carbonizadas sob 400°C; 15,6 TEP sob 600°C e de 14,5 TEP sob 800°C, por hectare. Logicamente a extrapolação destas cifras é válida apenas para uma área típica de mata de terra firme e para uma intensidade de exploração florestal mecanizada ao nível da que foi empreendida na Estação Experimental de Curuá-Una/Pa., por SUDAM³¹.

Os resíduos da exploração, atualmente são deixados na floresta sem uso definido, que poderiam ser aproveitados para geração de energia, particularmente sob a forma de carvão vege

Quadro: 27. ESTIMATIVA DA POTENCIALIDADE DA MADEIRA POR ÁREA (kjoule/ha).

Temperatura final de carbonização - °C	Volume de madeira por área (m³/ha) (a)	Rendimento em madeira serrada em %. $\frac{(b)}{100} *$	Resíduos de madeira em Kg/ha (a..b..c.d) $\frac{100}{100}$ (R)	Potencialidade ener- gética da madeira em Kjoule/Kg. (E)		Potencialidade energéti- ca por área em Kjoule / ha. (R x E)	
				Tempo de permanência no patamar final de carbo- nização em minutos			
				10	30	10	30
Madeira: Angelim pedra							

(*) Fonte: SUDAM³²

(c) 1 m³ de madeira serrada \approx 8 m³ de resíduos (JANKAUSKIS¹⁵)

Quadro: 28. RELAÇÃO ENTRE A POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA, CARVÃO VEGETAL E TONELADA EQUIVALENTE PETRÓLEO - TEP.

Temperatura final de carbonização - °C	Potencialidade energética por área - Kjoule/hectare (P.E)		Quantidade de carvão vegetal por área - Kg/hectare (P.E/P.C.S. do carvão*)		Tonelada Equivalente Petróleo - TEP (1 TEP = 1,59 ton.carvão)	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização - Minutos					
	10	30	10	30	10	30
Madeira: Angelim pedra						
400	2,8534 x 10 ⁸	2,8363 x 10 ⁸	8.804	8.645	5,54	5,44
600	2,3606 x 10 ⁸	2,3578 x 10 ⁸	6.838	6.758	4,30	4,25
800	1,9525 x 10 ⁸	1,8925 x 10 ⁸	5.841	5.661	3,67	3,56
Madeira: Maçaranduba						
400	6,0544 x 10 ⁸	5,6563 x 10 ⁸	20.304	18.262	12,77	11,49
600	4,8168 x 10 ⁸	4,8419 x 10 ⁸	13.894	13.796	8,74	8,68
800	4,3503 x 10 ⁸	4,2382 x 10 ⁸	12.985	12.764	8,17	8,03
Madeira: Cupiuba						
400	1,9964 x 10 ⁸	1,7961 x 10 ⁸	6.244	5.624	3,93	3,54
600	1,6729 x 10 ⁸	1,6285 x 10 ⁸	4.810	4.688	3,03	2,95
800	1,4874 x 10 ⁸	1,4397 x 10 ⁸	4.477	4.359	2,81	2,74

(*) P.C.S - poder calorífico superior do carvão vegetal

tal, principalmente considerando os grandes projetos de mineração que estão sendo implantados na Amazônia e que correspondem em gigantescos núcleos consumidores de carvão vegetal.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

Com base nos resultados e nas discussões apresentadas conclui-se que:

a) As três espécies estudadas possuem madeiras de alta densidade. Considerando-se que esta propriedade está correlacionada com alta densidade do carvão vegetal, e que as espécies em questão apresentam alto índice volumétrico na área, é a princípio esperado que possuam um bom potencial para produção de carvão vegetal.

b) O rendimento gravimétrico do carvão diminuiu, principalmente com o aumento da temperatura final de carbonização. O tempo de permanência no patamar final de carbonização, afetou muito pouco o rendimento.

Em termos de rendimento, considerando uma mesma temperatura e tempo de permanência, as madeiras de Angelim pedra e Maçaranduba destacaram-se com melhores resultados e boas perspectivas como fonte de matéria prima para produção de carvão vegetal. A madeira de Cupiuba apresentou rendimento inferior que as duas primeiras, no entanto, equivalente a madeira de eucaliptos carbonizada sob mesmas condições em trabalhos realizados por outros autores.

c) No tocante a densidade aparente do carvão, conclui-se que as madeiras de Angelim pedra e Maçaranduba apresentaram as melhores qualidades para produção de carvão vegetal. Este fato é devido a maior densidade básica da madeira destas espécies comparada com a de Cupiuba.

A temperatura final de carbonização foi o principal responsável pela variação da densidade aparente do carvão, que decresceu quando este fator de estudo passou de 400°C para 600°C, e voltou a aumentar quando passou de 600°C para 800°C. Esta observação é válida para todas as espécies estudadas.

d) Os teores de carbono fixo e materiais voláteis variaram, principalmente com a elevação da temperatura final de carbonização. O fator tempo de permanência no patamar final de carbonização não proporcionou efeitos marcantes sobre esses componentes químicos. O teor de carbono fixo aumentou, enquanto que o de materiais voláteis diminuiu a medida que se elevou a temperatura. As maiores variações desses compostos químicos aconteceram quando a temperatura passou de 400°C para 600°C , faixa na qual o carvão ainda liberou uma certa quantidade importante de gases volatilizáveis. Para uma mesma temperatura e mesmo tempo de permanência, as espécies tiveram comportamentos semelhantes diante destes fatores, registrando - se valores de carbono fixo e materiais voláteis bastante aproximados.

Com relação a teor de cinzas, conclui-se que os carvões apresentaram baixa porcentagem, equivalente ou mesmo inferior que a de alguns eucaliptos estudados por outros autores. Os fatores temperatura e tempo de permanência no patamar final de carbonização, são variáveis que não causaram alterações importantes sobre o respectivo teor.

e) O poder calorífico superior do carvão variou conforme as alterações das condições de carbonização. Entre os fatores de estudo, a temperatura foi o principal responsável por essa variação. Para uma mesma temperatura e mesmo tempo de permanência, o poder calorífico superior do carvão variou muito pouco entre as espécies estudadas. Observou-se ainda que o teor de carbono fixo e materiais voláteis, tem relação direta com o calor de combustão do carvão. Para as condições em que foi desenvolvido o trabalho, os valores de poder calorífico apresentaram poucas variações em relação às outras espécies carbonizadas sob semelhantes condições, mencionadas em literaturas.

f) A potencialidade energética da madeira, determinada com base no rendimento gravimétrico e poder calorífico superior do carvão, diminuiu com o aumento da temperatura e do tempo de permanência no patamar final de carbonização. Esta tendência foi fundamentalmente provocada pelo rendimento em peso do carvão que decresceu com o aumento da temperatura e do tempo de permanência. Entre os fatores de estudo, a temperatura foi o principal responsável pela queda da potencialidade. A maior variação aconteceu quando a temperatura passou de 400°C para

600°C. Para uma mesma temperatura e mesmo tempo de permanência a madeira de Angelim pedra destacou-se com maior potencialidade seguida de Maçaranduba e Cupiuba.

g) A potencialidade energética por área (kjoule/ha), foi mais marcantes para madeira de Maçaranduba. O fator de maior influência foi o volume de madeiras exploradas, o qual é bastante superior que o das outras espécies, e que reflete em grande estoque de resíduos deixados na floresta.

h) Considerando-se os resultados deste estudo e suas bases de cálculo, a conversão de resíduos da exploração florestal em carvão vegetal, traria uma economia de 21,4 TEP (tonelada equivalente petróleo), por hectare, utilizando-se uma temperatura de carbonização de 400°C; de 15,6 TEP utilizando-se uma de 600°C e de 14,5 TEP para uma de 800°C. Isto demonstra o grande potencial da floresta envolvida na produção de energia, a partir de simples aproveitamento de resíduos da exploração florestal.

Com base no estudo realizado, pode-se fazer as seguintes recomendações:

a) Desenvolver um experimento em escala piloto, adotando-se métodos convencionais de carbonização, afim de avaliar a real aplicabilidade das informações geradas neste estudo, a uma situação prática.

b) O experimento em escala piloto deverá incluir uma análise econômica, de forma que possa ser determinada a viabilidade da atividade para região envolvida.

c) Conduzir paralelamente, estudos visando avaliar alguns aspectos não abrangidos neste estudo, tais como: Determinação do tempo ideal de estocagem da madeira para produção de carvão; Determinação de propriedades mecânicas, especialmente, resistência à compressão e teste de tamboramento do carvão.

SUMMARY

The main objective of this study was to investigate the energetic potencial of a tropical lable-land forest type based on wood residues left during explotation, and transformed into charcoal. The area study is located at the Curuá-Una Experimental Station (Pará State), and belongs to the Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia - SUDAM.

The following species were studied: *Dinizia excelsa*, Ducke (Angelim pedra); *Manilkara huberi* (Ducke) Standl. (Maçaranduba) e *Goupia glabra*, Aubl. (Cupiuba).

The carbonization was carried out in a laboratory electric oven, using tree temperatures - 400°C, 600°C and 800°C, and two times of permanence at the final temperature - 10 and 30 minutes.

Several physical and quimical properties were determined: specific gravity (g/cm^3), fixe carbon content, volatile material and ash. Furthemore it was determined the gravity yield and superior calorific value. The data obtained in the laboratory were used to calculate the energetic potencial of the tree species when changed to charcoal.

The main results obtained were the following:

a) The final temperature of carbonization was the main factor affecting the charcoal properties.

b) The gravity yield decreased, principally with an increase of temperature.

c) The specific gravity of charcoal has a slight variation with temperature and time at the end of carbonization.

d) The fixed carbon and volatile material content varied when the temperature of carbonization was increased. The effect of time was less pronounced.

e) The superior calorific value of the charcoal varied

from approximately 29819 to 35096 kJoule/kg. The highest calorific value was obtained when wood was carbonized at 600°C for all species and time studied.

f) For the same carbonization temperature and time at final temperature, *Vinízia excelsa*, Ducke (Angelim pedra), presented the highest energetic potencial per cubic meter of wood.

g) Considering the energetic potencial per hectare, the more important species in terms of energetic potencial were *Manilkara huberi*, (Ducke) Standl. (Maçaranduba).

h) The production of charcoal from the wood residues left at the forest, using the mechanical logging tecnics described by SUDAM, represents an important source of energy. The results obtained in this study show that one hectare of forest can produce the equivalent to 21,4 TEP (equivalent in tons of fuel oil) when carbonization in comed out 400°C; 15,6 TEP for 600°C and 14,5 TEP for 800°C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, M.R. Recuperação de alcatrão em fornos de alve-naria. In: CETEC. Produção e utilização de carvão vege-tal. Belo Horizonte, 1982. p. 173 - 180 (SPT - 008).
2. BAILEYS, R.T. & BLANKENHORN, P.R. Calorific and porosity development in carbonized wood. Wood Science. 15(1) : 19 - 28, july, 1982.
3. BEALL, F.C. Introduction to thermal analyses in the com-bustion of wood. Wood Science. 5(2): 102 - 108, Oct. , 1972.
4. _____. Properties of wood during carbonization un-der fire conditions. Wood Technology Chemical As-pects. IS. Golstein ed. American Chemical Soc. Wa-shington DC. p. 107 - 114.
5. BEALL, F.C.; BLANKENHORN, P.R. & MOORE, G.E. Carbonized wood physical properties and as an SEM preparation. Wood Science. 6(3): 212 - 219. Jan., 1974
6. BLANKENHORN, P.R.; BARNES, D.P.; KLINE, D.E. & MURPHEY , W.K. Porosity and pore size distribution of black cher-ry carbonized in an inert atmosphere. Wood Science. 11(1): 23 - 29. July, 1978.
7. COLLET, F. Estudo comparativo, em escala laboratorial , de diversas madeiras utilizadas na fabricação de car-vão vegetal. São Paulo. ABM. 12(42): 5 14, Jan., 1956.
8. DOAT, J. & PETROFF, G. La carbonization des bois tropi-caux. Revue Bois et Forêts des tropiques. Nojent sur Marne/France. Centre Technique Forestier Tropical-CTFT 159: 55 - 72, jan./fev., 1975.

9. EARL, D.E. Charcoal. André Mayer Research Fellow. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 1974. 97 p.
10. FAIBRIGDE, C. & ROSS, R.A. The thermal reativity of wood waste systems. Wood Science and Technology. 12: 169 - 185. 1978.
11. FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DO PARÁ; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS & SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA. Biomasa Brasil (Amazônia oriental) Levantamento preliminar da oferta de madeiras da mata amazônica. Belém. 1981. 110 p. (não publicado).
12. GOMES, P.A. & OLIVEIRA, J.B. Teoria de carbonização da madeira. In: CETEC. Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, 1980. p. 27 - 41 (SPT - 001).
13. HARRIS, A.C. Charcoal production. Eighth World Forestry Congress. Fakarta, 1978. p. 16 - 28.
14. HUMPHREYS, G.E. Ironside. Forestry Comission of the New South Wales third ed. Research Note: 44. 1980.
15. JANKAUSKIS, J. Avaliação de resíduos florestais oriundos da exploração mecanizada de floresta tropical densa de terra firme. Curitiba. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal. 1983. 103 p.
16. KARCHESY, J. & KOCH, P. Energy production from hardwood growing on southern pines sites. U.S. Department Report SO-24, 59 p. Southern Forest Experiment Station. New Orleans. 1979.
17. KOROBKIN, V.A. Optimum temperature of carbonization of wood. Stal Maskvá 8, 1948 (487 - 494) (RUN) Chemical Abstrat. 44(3). 1950.
18. KRILA, J.M. Characteristics of carbonized wood affected by extration. Wood Science. 13(1): 18 - 25, july. 1980.

19. LAMAXANA, N.B. Proximate chemical analyses of charcaol from some philippines woods. Forpride Digest. 7(213) : 48 - 53. Magazine Forest Production Research and Industries Development. sd.
20. MENDES, M.G.; GOMES, P.A. & ALMEIDA, M.R. Propriedades do carvão vegetal. In: CETEC. Produção e Utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte. 1982. p. 75 - 89 (SPT-008).
21. NANASSY, A.J. & FUNG, D.P.C. Pyrolyses of wood studied by E.S.R. Wood Science. 7(3): 232 - 239. Jan., 1975.
22. OLIVEIRA, J.B. & ALMEIDA, M.R. Avaliação de carvão vegetal. In: CETEC. Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte. 1980. p. 43 - 53 (SPT - 001).
23. OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A. & ALMEIDA, M.R. Propriedades do carvão vegetal. In: CETEC. Carvão vegetal. Belo Horizonte. 1982. p. 39 - 62 (SPT - 006).
24. OLIVEIRA, J.B.; VIVACQUA Filho, A. ; MENDES, M.G. & GOMES, P.A. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: CETEC. Produção e Utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte. 1982. p. 59 - 72 (SPT - 008).
25. PETROFF, G. & DOAT, J. Pirololyse des bois tropicaux - Influence de la composition chimique de bois sur les produits de distillation. Revue Bois et Forêts des Tropiques. Nojent sur Marne/France. Centre Technique Forestier Tropical-CTFT. 177: 51 - 64. Jan./Fev., 1978.
26. PANDOLFO, C. A Amazônia Brasileira e suas potencialidades. Belém. SUDAM. 1979. 74 p.
27. RAMALHO, A. de M. Carvões vegetais para gasogênios. Ministério da Economia. Comissão reguladora do comércio de carvões. Lisboa. 1943 - 1945. 110 p.

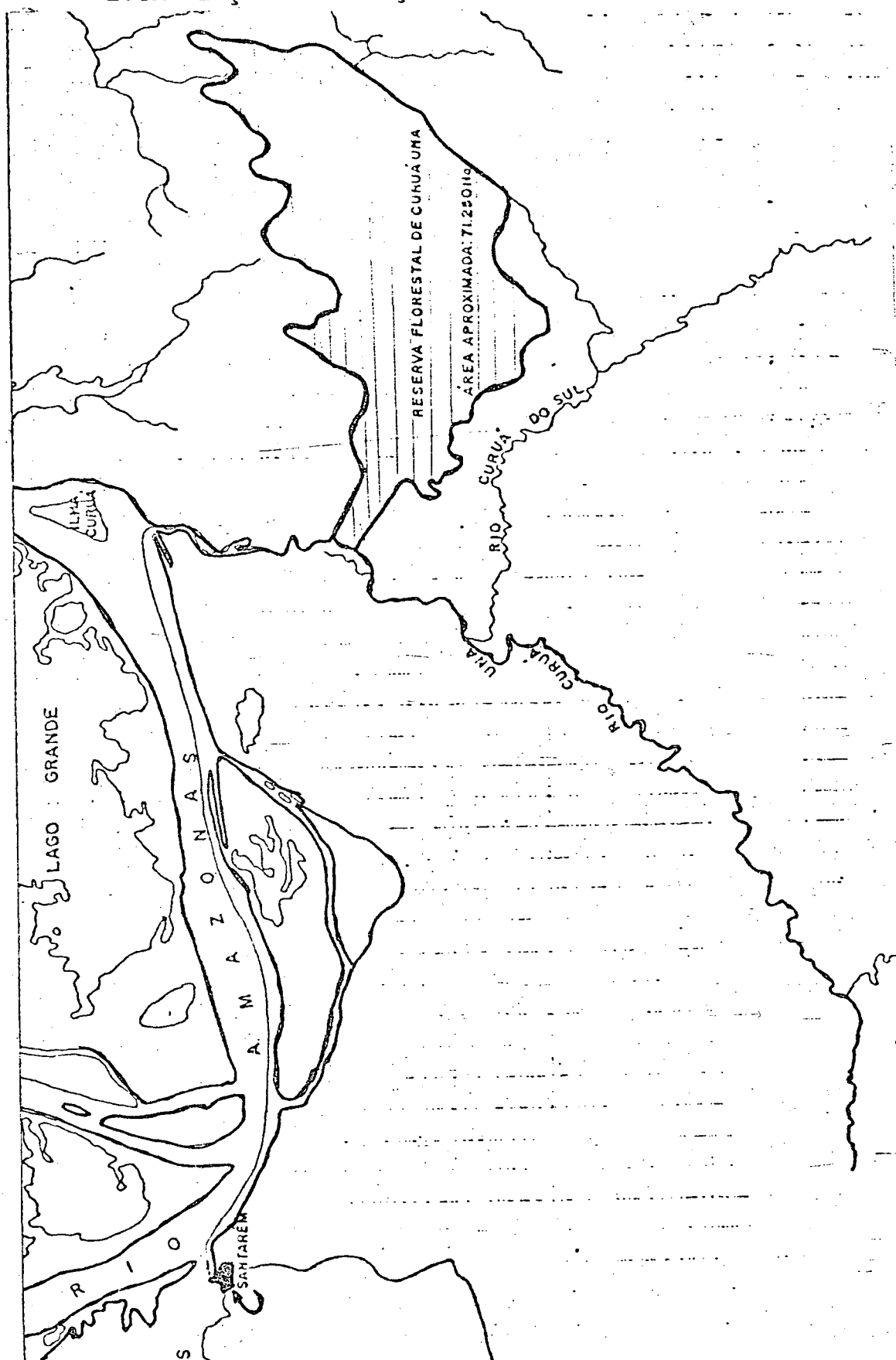
28. SATONAKA, S. Carbonization and gaseification of wood. Energy from forest biomass. ed. by W. Ramsay Smith College of forests resources. Univerty of Washington , scattle. Washington. XVII-IUFRO World Congress Energy Group Proceeding. Academic Press, 1982. p.147 - 154.
29. §LOCUM, D.H.; MGGINES Jr., E.A. & BEALL, F.C. Charcoal yield shrinkage and density changes during carbonization of OAK and HICTORY woods. Wood Science. 11(1): 42 - 47, july. 1978.
30. STEEL, R.G. & TORRIE, J.H. Principles and Procedures of statistics. New York. McGRAW-Hill Book Company. 1960 . 481 p.
31. SUPERINTEDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA. Estudo de viabilidade técnico-econômica da exploração mecanizada em floresta de terra firme, região de Curuá-Una. Belém. SUDAM, IBDF, PRODEPEF, 1978. 146p.
32. SUPERINTEDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA. Pesquisas e Informações sobre espécies florestais da Amazônia. Belém. SUDAM, 1979. 111 p.
33. SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA & INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Grupamento de espécies da Amazônia por similaridade de características básicas e por utilização. Belém. SUDAM, IPT. 1981. 237 p.
34. UHART, E. A floresta amazônica; Fonte de energia. Belém. SUDAM. 1976. 114 p.
35. VEADO, J.T.; ABDALA, E.; FERNANDEZ, M. de P. & KLINGL, O. Tecnologia avançada para produção de carvão vegetal. Metarlugia. ABM. 33(239): 596 - 603. Out., 1977.
36. WENZL, H.F.J. The chemical technology of wood. New York. Academic Press. 1970. 692 p.

A N E X O S

ANEXO 1 - FIGURA 1

LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURUÃ-UNA

LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURUÁ-UNA



ANEXO 2 - QUADRO 1

INVENTÁRIO FLORESTAL DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURUÁ-UNA

INVENTÁRIO FLORESTAL DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURUA-UNA, TALHÃO 18 COM 100 HECTARES

VOLUME TOTAL - 4819,10 M³
 VOLUME POR HECTARE - 48,191 M³
 Nº TOTAL DE ÁRVORES - 837 ÁRVORES
 Nº DE ÁRVORES POR HECT. - 8,37 ÁRVORES
 VOLUME MÉDIO POR ARV. - 5,76 M³
 DIÂMETRO MÉDIO - 0,80 M
 ALTURA MÉDIA - 18,00 M

VOLUME TOTAL COM CASCA POR ESPÉCIES E POR CLASSE DE DIÂMETRO EM M³

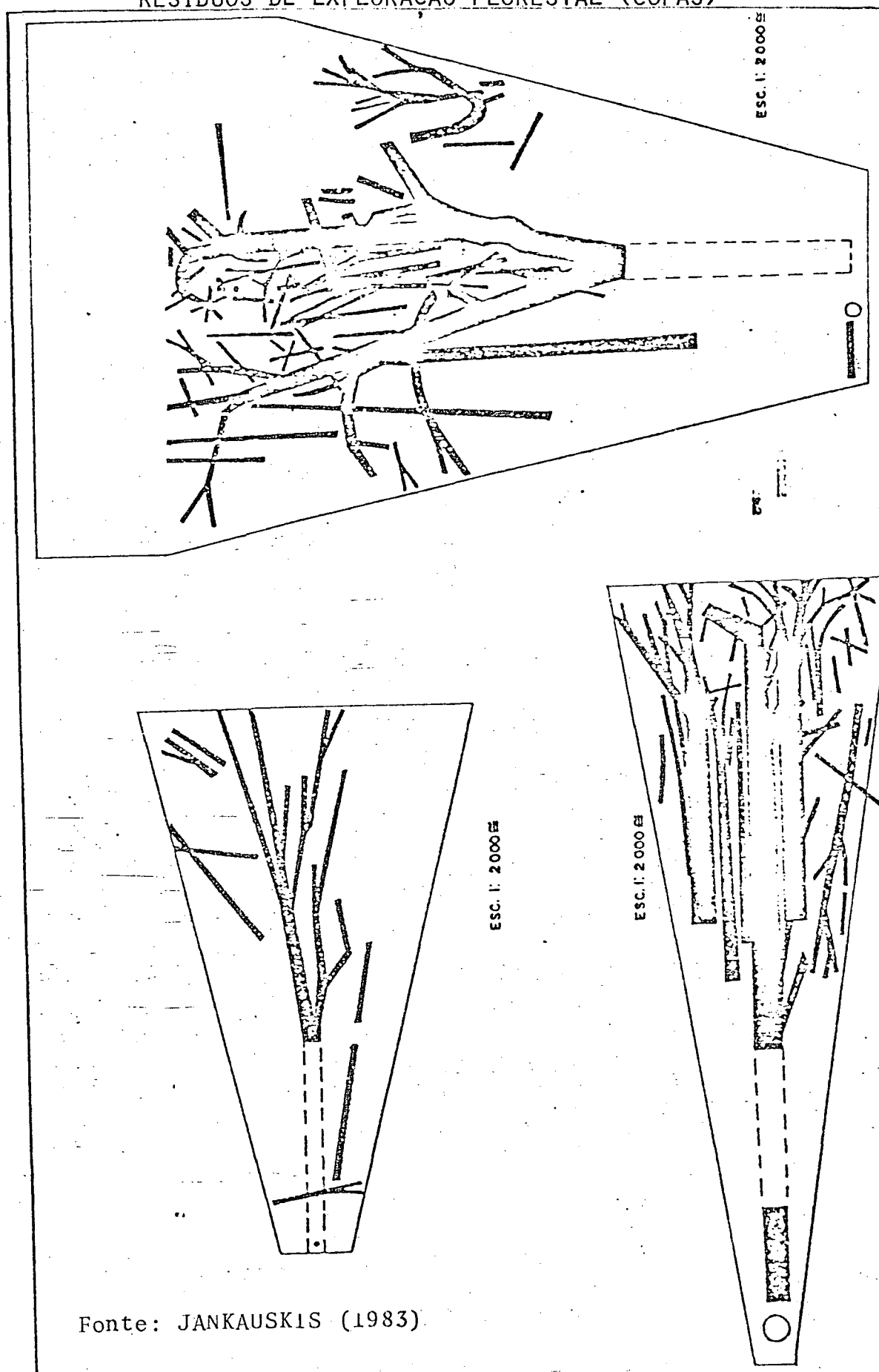
Nº	ESPÉCIE	45 - 65		65 - 85		85 - 105		105 - 125		125 - 199		TOTAIS	
		Nº	VOLUME	Nº	VOLUME	Nº	VOLUME	Nº	VOLUME	Nº	VOLUME	Nº	VOLUME
01	Abiorana	01	2,8	01	5,0	00	00	00	00	00	00	2	7,8
02	Abiorana branca	11	33,8	03	13,4	00	00	00	00	00	00	14	47,2
03	Acapu	00	00	02	10,2	00	00	00	00	00	00	2	10,2
04	Angelim da mata	01	2,8	02	8,4	02	21,2	01	17,7	00	00	6	50,1
05	Angelim pedra	09	28,6	37	211,4	26	262,4	02	32,1	00	00	74	534,5
06	Achicha	01	3,5	00	00	00	00	00	00	00	00	1	3,5
07	Castanha do Pará	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
08	Castanha Sapucaia	05	17,2	11	59,5	05	47,5	00	00	00	00	21	124,2
09	Cedro	00	00	01	4,2	00	00	00	00	00	00	1	4,2
10	Coração de negro	02	5,7	00	00	00	00	00	00	00	00	2	5,7
11	Cuiarana	04	13,2	08	43,8	02	18,0	00	00	00	00	14	75,0
12	Cupiuba	27	87,6	74	394,1	04	37,4	00	00	00	00	105	519,1
13	Fava	02	6,3	00	00	00	00	00	00	00	00	2	6,3
14	Fava arara tucupi	06	20,0	11	62,3	03	28,2	01	16,7	00	00	21	127,2
15	Fava folha fina	15	46,2	19	92,7	02	16,9	00	00	00	00	36	155,8
16	Fava mari mari	00	00	02	9,2	00	00	00	00	00	00	2	9,2
17	Fava orelha	00	00	01	5,9	02	23,0	01	17,7	00	00	4	46,6
18	Fava vingue	03	9,5	04	22,8	00	00	00	00	00	00	7	32,3
19	Glicia	02	6,9	02	10,0	00	00	00	00	00	00	4	16,9
20	Itauba	00	00	08	46,6	00	00	00	00	00	00	8	46,6
21	Jutai-açu	01	3,5	03	17,7	03	33,2	00	00	00	00	7	54,4
22	Jutai-mirim	00	00	01	5,0	00	00	00	00	00	00	1	5,0
23	Louro amarelo	01	2,8	02	9,2	01	7,9	00	00	00	00	4	19,9
24	Louro branco	01	2,8	01	4,2	00	00	00	00	00	00	2	7,0
25	Louro canela	00	00	02	9,5	01	7,9	00	00	00	00	3	17,4
26	Massaranduba	57	186,9	139	745,0	29	360,1	01	13,2	00	00	236	1305,2
27	Mamorana	03	8,5	05	25,3	00	00	00	00	00	00	8	33,8
28	Matamatá preto	01	3,5	00	00	00	00	00	00	00	00	1	3,5
29	Mandioqueira aspera	03	10,3	08	46,6	02	23,0	00	00	00	00	13	79,9
30	Mandioqueira escam.	01	3,5	01	6,8	02	19,4	00	00	00	00	4	29,7
31	Mandioqueira rosa	00	00	02	10,0	00	00	00	00	00	00	2	10,0
32	Marupá	00	00	03	14,0	01	7,9	00	00	00	00	4	21,9
33	Muiracatira	03	10,4	18	94,7	05	53,2	01	14,4	00	00	27	172,7
34	Muiratinga	00	00	01	4,5	00	00	00	00	00	00	1	4,5
35	Parapará	00	00	01	4,2	00	00	00	00	00	00	1	4,2
36	Pau d'arco	00	00	03	17,8	02	19,2	00	00	00	00	5	37,0
37	Piquia	00	00	04	26,2	15	152,0	04	67,1	02	40,8	25	286,1
38	Preciosa	02	7,0	09	46,7	02	19,2	00	00	00	00	13	72,9
39	Quaruba	01	3,5	09	51,5	06	67,8	04	70,8	00	00	20	193,6
40	Quarubarana	02	7,0	05	27,8	03	25,9	01	17,7	00	00	11	78,4
41	Sucupira	04	13,8	01	5,0	00	00	00	00	00	00	5	18,8
42	Tachi pitomba	30	100,5	73	361,2	01	7,9	00	00	00	00	104	469,6
43	Tamaquaré	00	00	06	33,4	01	11,5	00	00	00	00	7	44,9
44	Tatajuba	00	00	01	5,0	00	00	00	00	00	00	1	5,0
45	Ucuba	01	3,1	00	00	00	00	00	00	00	00	1	3,1
46	Maparajuba	02	7,0	01	4,2	00	00	00	00	00	00	3	11,2
47	Muirapixuna	00	00	01	4,2	00	00	00	00	00	00	1	4,2
48	Capitui	01	2,8	00	00	00	00	00	00	00	00	1	2,8
	TOTAIS	203	661,0	486	2579,2	130	1270,7	16	267,4	02	40,8	837	4819,1

Fonte: SUDAM (1978)

ANEXO 3 - FIGURA 2

RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL (COPAS)

RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL (COPAS)



Fonte: JANKAUSKIS (1983).

ANEXO 4 - FIGURA 3

DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL POR HECTARE

DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS POR HECTARE (lha)

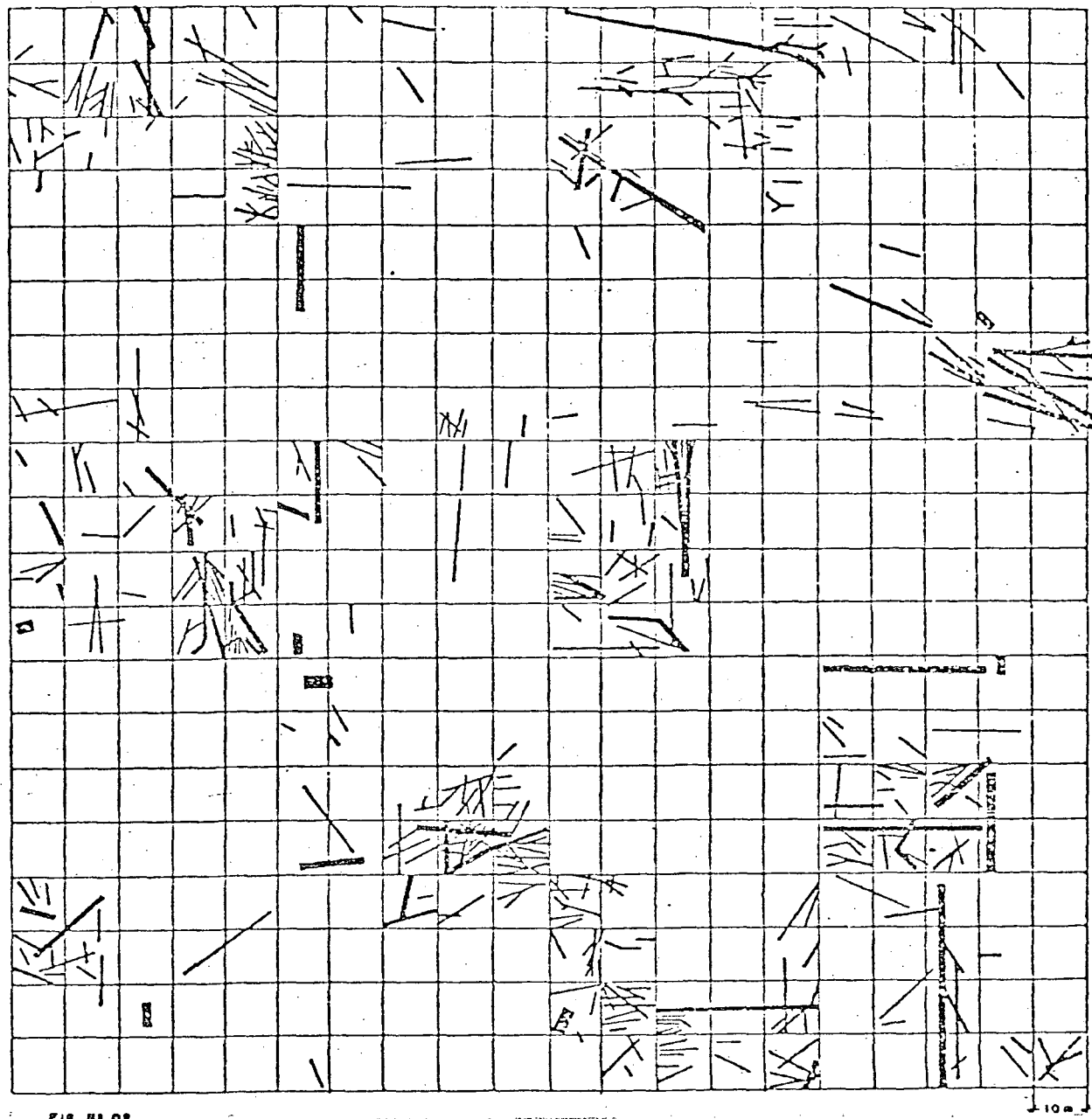


FIG. 83 09

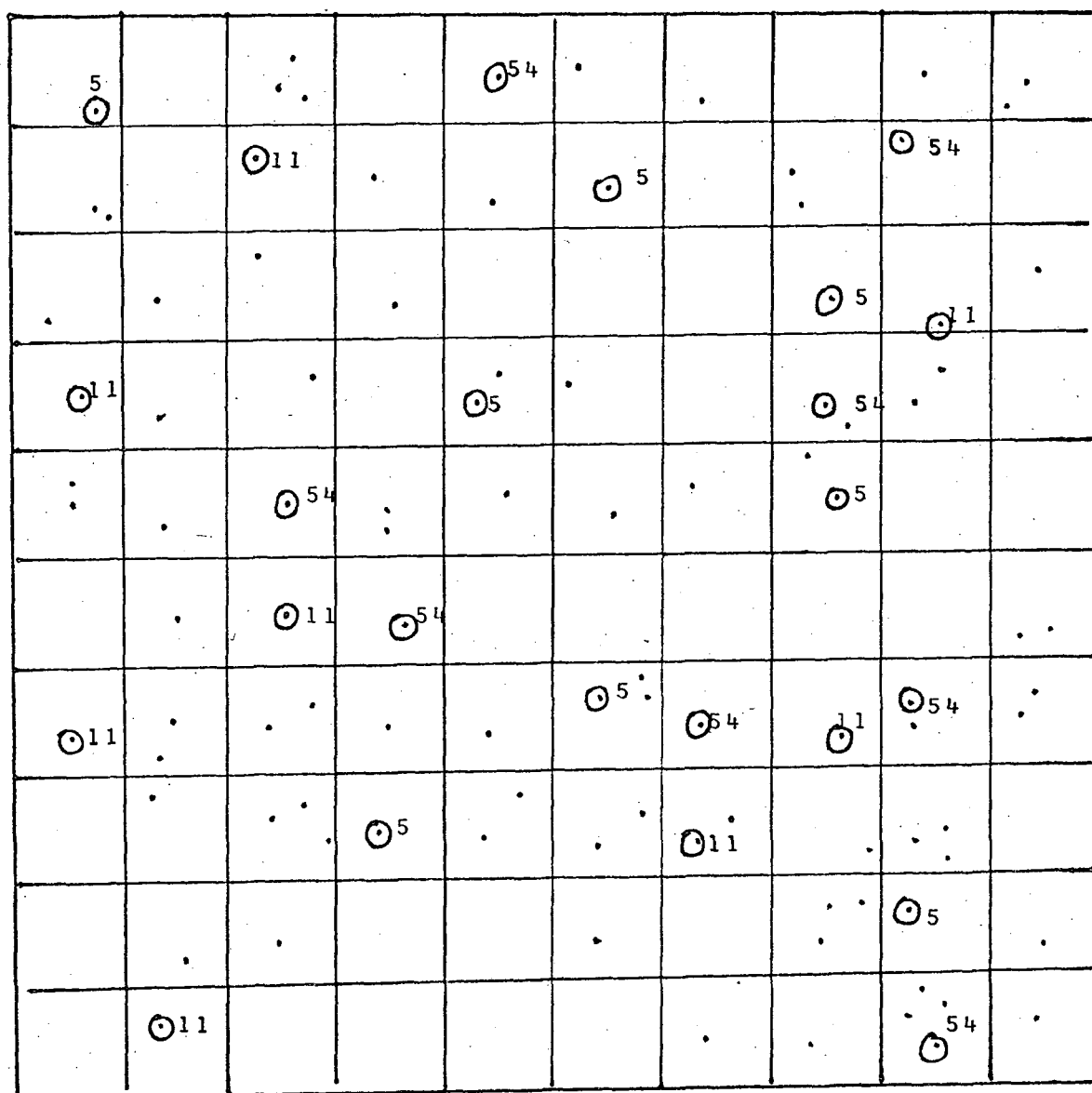
100

Fonte: JANKAUSKIS (1983)

ANEXO 5 - FIGURA 4

MAPA DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL

PARTE DO MAPA DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL



(5) - *Dinizia excelsa*, Ducke (Angelim pedra)

(11) - *Manilkara huberi* (Ducke) Standl. (Maçaranduba)

(54) - *Goupia glabra*, Aubl. (Cupiuba)

ANEXO 6 - QUADRO 2

TESTE DE BARTTLET PARA RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO EM
CARVAÕ, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

TESTE DE BARTTLET PARA RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO EM
CARVÃO, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

Propriedade	$\chi^2_{cal.}$	$\chi^2_{tab.}$	Conclusão
Rendimento gravimétrico em carvão	13,81	27,59	$\chi^2_{cal.} < \chi^2_{tab.}$.. Acaita-se a hipótese nula (H_0). As variâncias são homogêneas entre si. $s_1^2 = s_2^2 = \dots = s_{18}^2$

ANEXO 7 - QUADRO 3

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO EM CAR-
VÃO (BASE SECA)

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO EM CARVÃO (BASE SECA)

F.V.	gl	SQ	QM	F
Tratamento	17	3.216,79	191,87	581,42**
Espécie (A)	2	381,81	190,91	578,50**
Tempo (B)	1	39,24	39,24	118,91**
Temperatura (C)	2	2.676,46	1.338,23	4.055,24**
A x B	2	7,60	3,80	11,52**
A x C	4	116,40	29,10	88,18**
B x C	2	28,83	14,42	43,68**
A x B x C	4	11,45	2,86	8,67**
Erro	72	23,64	0,33	
Total	89	3.285,43		

** - Significante ao nível de 1% de probabilidade.

ANEXO 8 - QUADRO 4

TESTE DE BARTTLLET PARA DENSIDADE APARENTE DO CAR-
VÃO VEGETAL, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE.

TESTE DE BARTTLET PARA DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO VEGETAL, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

Propriedade	χ^2 cal.	χ^2 tab.	Conclusão
Densidade Aparente do carvão	13,33	27,59	χ^2 cal. < χ^2 tab. Aceita-se a hipótese nula (H_0). As variâncias são homogêneas entre si. $s_1^2 = s_2^2 = s_3^2 = \dots = s_{18}^2$

ANEXO 9 - QUADRO 5

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE APARENTE DO
CARVÃO VEGETAL

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE APARENTE DO
VÃO VEGETAL

F.V.	gl	SQ	QM	F
Tratamento	17	0,2926	0,01721	191,22**
Espécie (A)	2	0,23225	0,11613	1.290,33**
Tempo (B)	1	0,00006	0,00006	0,06 ^{ns}
Temperatura (C)	2	0,05017	0,02509	278,77**
A x B	2	0,00006	0,00003	0,33 ^{ns}
A x C	4	0,00086	0,00021	2,44**
B x C	2	0,00025	0,00013	1,44 ^{ns}
A x B x C	4	0,00895	0,000224	2,49**
Erro	72	0,062	0,00009	
Total	89	0,2988		

** - Significante ao nível de 1% de probabilidade

ANEXO 10 - QUADRO 6

TESTE DE BARTTLLET PARA CARBONO FIXO, MATERIAS VOLÁTEIS
E CINZAS, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

TESTE DE BARTTLET PARA CARBONO FIXO, MATERIAIS VOLÁTEIS
E CINZAS, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

Propriedade	χ^2 calculado	χ^2 tabelar	Conclusões
Carbono Fixo	10,96	27,59	χ^2 cal. < χ^2 tab.. Aceita-se a hipótese nula (H_0). As <u>va</u> riâncias são homogêneas entre si. $s_1^2 = s_2^2 = s_3^2 = \dots = s_{18}^2$
Materiais Voláteis	8,89	27,59	χ^2 cal. < χ^2 tab.. Aceita-se a hipótese nula (H_0). As <u>va</u> riâncias são homogêneas entre si. $s_1^2 = s_2^2 = s_3^2 = \dots = s_{18}^2$
Cinzas	16,15	27,59	χ^2 cal. < χ^2 tab.. Aceita-se a hipótese nula (H_0). As <u>va</u> riâncias são homogêneas entre si. $s_1^2 = s_2^2 = s_3^2 = \dots = s_{18}^2$

ANEXO 11 - QUADRO 7

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE CARBONO FIXO (BASE SECA)

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE CARBONO FIXO (BASE SECA)

F.V.	gl	SQ	QM	F
Tratamento	17	7.352,36	432,48	436,84**
Espécie (A)	2	7,98	3,99	4,03**
Tempo (B)	1	39,26	39,26	39,65**
Temperatura (C)	2	7.276,88	3.638,44	3.675,19**
A x B	2	4,50	2,25	2,27**
A x C	4	18,03	4,50	4,55**
B x C	2	3,92	1,96	1,97 ^{ns}
A x B x C	4	1,68	0,42	0,43 ^{ns}
Erro	72	71,89	0,99	
Total	89	7.424,25		

** - Significante ao nível de 1% de probabilidade

ANEXO 12 - QUADRO 8

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE MATERIAIS VOLÁTEIS (BASE SECA)

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE MATERIAIS VOLÁTEIS (BASE SECA)

F.V.	gl	SQ	QM	F
Tratamentos	17	7.328,27	431,07	532,19**
Espécie (A)	2	0,70	0,35	0,34 ^{ns}
Tempo (B)	1	47,82	47,82	47,34**
Temperatura (C)	2	7.264,24	3.632,12	3.596,15**
A x B	2	2,77	1,38	1,37 ^{ns}
A x C	4	20,85	5,21	5,16**
B x C	2	2,38	1,19	1,17 ^{ns}
A x B x C	4	4,91	1,22	1,21 ^{ns}
Erro	72	72,46	1,01	
Total	89	7.400,73		

** - Significante ao nível de 1% de probabilidade

ANEXO 13 - QUADRO 9

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CINZAS (BASE SECA)

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR DE CINZAS (BASE SECA)

F.V.	gl	SQ	QM	F
Tratamentos	17	5,0094	0,29467	166,27**
Espécie (A)	2	4,72429	2,36215	1.332,87**
Tempo (B)	1	0,00784	0,00784	4,42**
Temperatura (C)	2	0,23293	0,11647	65,71**
A x B	2	0,00024	0,00012	0,06 ^{ns}
A x C	4	0,03974	0,00994	5,60**
B x C	2	0,00366	0,00188	1,06 ^{ns}
A x B x C	4	0,0007	0,00018	0,09 ^{ns}
Erro	72	0,1276	0,00177	
Total	89	5,137		

** - Significante, ao nível de 1% de probabilidade

ANEXO 14 - QUADRO 10

TESTE DE BARTTLET PARA PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO
CARVÃO, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

TESTE DE BARTTLET PARA PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO
CARVÃO, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

Propriedade	χ^2 cal.	χ^2 cal.	Conclusão
Poder Calorífico Superior do carvão	25,12	27,59	χ^2 cal. < χ^2 cal.. Acei- ta-se a hipótese nula (H_0). As variâncias são homogê- as entre si. $s_1^2 = s_2^2 = s_3^2 = \dots = s_{18}^2$

ANEXO 15 - QUADRO 11

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO
CARVÃO.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO
CARVÃO

F.V.	gl	SQ	QM	F
Tratamento	17	178.921.110	10.524.771,18	112,18**
Espécie (A)	2	7.000.000	3.500.000,00	37,31**
Tempo (B)	1	1.000.000	1.000.000,00	10,66**
Temperatura (C)	2	148.895.430	74.447.715,00	793,52**
A x B	2	1.000.000	500.000,00	5,33**
A x C	4	18.104.570	4.526.143,00	48,24**
B x C	2	1.372.570	686.285,00	7,31**
A x B x C	4	2.548.540	637.135,00	6,79**
Erro	72	6.755.030	93.819,86	
Total	89	185.676.140		

** - Significante ao nível de 1% de probabilidade.

ANEXO 16 - QUADRO 12

TESTE DE BARTTLET PARA POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA
MADEIRA, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

TESTE DE BARTTLET PARA POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA
MADEIRA, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

Propriedade	$\chi^2_{cal.}$	$\chi^2_{cal.}$	Conclusão
Potencialida de Energeti- ca da madei- ra	24,47	27,59	$\chi^2_{cal.} < \chi^2_{cal.}$.. Aceita-se a hipótese nula (H_0). As variâncias são homogêne- as entre si. $s_1^2 = s_2^2 = s_3^2 = \dots = s_{18}^2$

ANEXO 17 - QUADRO 13

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA
MADEIRA, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA
MADEIRA, AO NÍVEL DE 95% DE PROBABILIDADE

F.V.	gl	SQ	QM	F
Tratamento	17	259.012.810	15.236.048	345,28**
Espécie (A)	2	46.987.810	23.493.905	532,43**
Tempo (B)	1	2.968.430	2.968.430	67,27**
Temperatura (C)	2	194.884.860	97.442.430	2.208,28**
A x B	2	816.400	408.200	9,25**
A x C	4	10.985.560	2.746.390	62,24**
B x C	2	1.683.270	841.635	19,07**
A x B x C	4	686.560	171.640	3,89**
Erro	72	3.177.080	44.126	
Total	89	262.189.890		

** - Significante ao nível de 1% de probabilidade